

Scuola di scienze
DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA
CORSO DI LAUREA IN FISICA

STUDIO E RIPRODUZIONE
DELLE OMBRE ELETTRICHE
DI AUGUSTO RIGHI

RELATORE:
PROF.SSA LAURA FABBRI

PRESENTATA DA:
CHIARA PELLEGRINI

CORRELATORE:
PROF. EUGENIO BERTOZZI

ANNO ACCADEMICO 2018/2019

Abstract

In questa tesi si riscopre la figura di Augusto Righi (1850-1920), fisico bolognese di prestigio e fama internazionale. In occasione del centenario della sua morte, si vuole omaggiare e diffondere i contributi dati alla scienza da questo illustre predecessore. Righi è stato capace di esplorare gran parte degli ambiti della fisica noti al suo tempo, sia a livello teorico che pratico; inoltre era rinomato per essere un gran insegnante, chiaro e comprensibile, merito anche della scelta di utilizzare esperimenti dimostrativi nel corso delle sue lezioni. Fu il fondatore dell'Istituto di Fisica di Bologna, all'interno del quale riservò un ampio spazio ai laboratori e al museo composto prevalentemente da strumenti e apparecchiature da lui utilizzate. Infine si approfondiscono i fenomeni da lui studiati delle "ombre elettriche", per poi riprodurli in laboratorio e interpretarli in chiave moderna. Tali ombre si ottengono per mezzo di un oggetto inserito all'interno di un campo elettrico e sono costituite da particolari polveri che si dispongono su una superficie parallela all'oggetto, disegnandone il contorno.

Indice

Introduzione.....	5
1. Augusto Righi	6
1.1. Contesto storico	6
1.2. Biografia	9
1.3. Pensiero e impatto culturale	11
1.4. Principali contributi	13
2. Ombre Elettriche	17
2.1. Esperienze anteriori	17
2.2. Interpretazione di Righi delle ombre elettriche	21
2.3. Ombre su lastre conduttrici.....	27
2.4. Ombre su lastre isolanti	31
2.5. Ombre composte e ombre inverse	36
3. Riproduzione in laboratorio.....	45
3.1. Rilettura in chiave moderna	45
3.2. Apparato sperimentale.....	50
3.3. Ombre con ferro in polvere	55
3.4. Ombre con minio e zolfo in polvere	58
Conclusione	63
Ringraziamenti.....	64
Bibliografia	65

Introduzione

<< Augusto Righi fu, nel grande periodo nel quale è nata la fisica di oggi, l'unico fisico italiano di statura internazionale, considerato dai grandi della fisica europea come uno di loro >>¹

Con queste parole Antonio Rostagni conclude la commemorazione dedicata ad Augusto Righi per il cinquantesimo anniversario della sua morte.

Nel 2020, in particolare l'8 giugno, ricorre il centenario della morte di Augusto Righi: grande fisico Bolognese di fama internazionale, il cui prestigio, al giorno d'oggi, è sconosciuto ai più. Con questa tesi si vorrebbe rendere omaggio e far conoscere un grande scienziato, candidato più volte al premio Nobel. Righi è stato definito successore di Heinrich Rudolf Hertz per lo studio e la riproduzione di onde elettriche, è inoltre riconosciuto come il fisico italiano più eminente dopo Alessandro Volta¹ ed era sempre opinione di Orso Mario Corbino (suo allievo indiretto, professore di fisica sperimentale, direttore dell'Istituto fisica dell'Università di Roma, senatore e futuro ministro della Pubblica Istruzione²) che ci sarebbe voluta almeno una altra generazione prima che qualcun altro italiano potesse raggiungere il livello di Righi; di lì a poco Corbino conobbe personalmente un ragazzo di nome Enrico Fermi.

I membri della Royal Institution of Great Britain, in una riunione tenutasi poco dopo la morte di Righi, lo qualificarono come << un pioniere di molte branche del progresso scientifico, che durante i cinquanta anni trascorsi ha aperto una nuova era della fisica >>¹ inoltre << il suo nome [Augusto Righi] è connesso con tutti i grandi problemi della filosofia naturale risolti negli ultimi anni >>¹.

Il campo di studi di Righi spaziava su quasi tutte le nozioni note al suo tempo e le sue pubblicazioni, circa duecentocinquanta, si distribuiscono uniformemente tra il 1872, anno in cui si diplomò in ingegneria, e il 1920 quando morì mentre stava ancora scrivendo dei lavori poi pubblicati postumi.

In questa tesi in particolare verranno ripresi gli studi effettuati da Righi riguardanti le Ombre Elettriche. Dopo un'attenta analisi dei risultati da lui ottenuti e riportati nelle *"Memorie della Accademia delle scienze dell'Istituto di Bologna"*, si illustrerà il fenomeno utilizzando termini contemporanei e si riprodurranno le Ombre Elettriche in laboratorio.

1. Augusto Righi

In questo primo capitolo approfondirò la figura di Augusto Righi all'interno del suo periodo storico e culturale. Ripercorrerò la costruzione dell'Istituto di Fisica di Bologna voluto da Righi e inaugurato nel 1907 per poi accennare ai principali contributi scientifici che diede alla fisica, essi spaziano su quasi tutti gli ambiti allora conosciuti.

1.1. Contesto storico

Tra il XVI e il XVII secolo Bologna si contraddistinse per la sua lunga e celebre tradizione accademica e universitaria, specialmente in ambito delle scienze fisiche e astronomiche. Alcuni protagonisti di quel periodo furono Niccolò Copernico (1473-1543) col suo modello planetario eliocentrico ed eliostatico, Francesco Maria Grimaldi (1618-1663) coi suoi studi sperimentali dimostranti la diffrazione della luce dai quali ipotizzò la natura ondulatoria dei fenomeni luminosi.

Nel 1711, sotto volere del generale Luigi Ferdinando Marsigli (1658-1730) fu fondato l'*Istituto delle Scienze*, questo in seguito diventerà l'*Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna*. Inizialmente le discipline e le ricerche erano ancora intensamente interdisciplinari e intrecciate fra di loro.

Prospero Lambertini (1675-1758), sia in qualità di Cardinale Arcivescovo di Bologna, sia successivamente al 1740 come Papa Benedetto XIV, attuò una suddivisione disciplinare: i laboratori dell'Accademia delle Scienze furono trasformati in veri e propri *Gabinetti scientifici e disciplinari*, in particolare quello di Fisica fu istituito nel 1745. Nonostante questi, l'attività degli scienziati, tra i maggiori ricordiamo Laura Bassi Veratti (1711-1778) che fu la seconda donna a laurearsi in Italia e la prima donna al mondo titolare di una cattedra universitaria (ottenne quella di fisica sperimentale nel 1776) e Luigi Galvani (1737-1798) che nel 1791 pubblicò il suo celebre *De viribus electricitatis in motu musculari commentarius*, si svolgeva per lo più privatamente.

Questi laboratori furono utilizzati anche da Augusto Righi (1850-1920). Righi, seguendo l'esempio della cultura scientifica e internazionale del tempo, in particolare la creazione di Grandi Istituti di Fisica realizzata a Cambridge nel 1874 da James Clerk Maxwell (1831-1879), fece costruire a Bologna l'Istituto di Fisica di via Irnerio 46. Questo fu inaugurato il 12 aprile 1907 e in tale occasione Righi tenne una lezione inaugurale. Come sua consuetudine, parte

integrante della lezione furono diversi esperimenti divulgativi; questi erano inseriti proprio per agevolare i partecipanti nella comprensione delle spiegazioni da lui fornite. Righi fu un spettacolare conferenziere e un grande didatta, molto chiaro nelle spiegazioni grazie anche ai numerosi esperimenti che riproduceva durante le lezioni. Alle sue lezioni assistevano studenti iscritti a Facoltà di Scienze, Matematica, Fisica; ma anche di Medicina, Farmacia e Veterinaria, per i quali teneva dei corsi speciali e dei corsi di Fisica³.

In quel periodo storico gli esperimenti con l'elettricità non erano usati per scopi didattici ed epistemologici come aveva fatto invece Righi; in generale essi servivano per verificare o confutare teorie e ipotesi oppure anche per stupire, meravigliare e dilettere le persone facoltose. Infatti, già dal settecento i fenomeni elettrici venivano diffusi come curiosità e giochi nei salotti borghesi, si producevano scintille, si attraevano o respingevano corpi; talvolta erano un immaginario metodo di cura: nel romanzo di Mary Shelley del 1818, il dottor Frankenstein utilizza una scarica di corrente elettrica per dare vita alla sua creatura⁴.

Nell'Ottocento Michael Faraday (1791-1867) e Maxwell portarono lo studio della elettricità classica al suo vertice più alto. Maxwell, come egli stesso scrisse nella prefazione del *Treatise on electricity and magnetism* del 1873, decise di non leggere nessun altro documento riguardante l'elettricità, se non prima di aver studiato le *Ricerche sperimentali* di Faraday. Quest'ultimo infatti, concepiva i fenomeni diversamente rispetto ai matematici del tempo: non si esprimeva in maniera convenzionale, ma secondo Maxwell era possibile esprimere le idee di Faraday nel linguaggio matematico comune, per poi paragonarle con quelle già preesistenti. A dire dello stesso Maxwell il suo lavoro consistette in parte nel dare una forma matematica alle idee e intuizioni di Faraday; però secondo Emilio Segrè, probabilmente Maxwell era l'unico capace di estrarre da Faraday le idee teoriche fondamentali. I metodi di Faraday partivano dal generale per poi giungere al particolare, non erano riportati con un linguaggio matematico universale bensì con un intuito geometrico e spaziale; contrariamente gli ordinari metodi matematici partivano dal particolare per poi giungere all'universale. Nonostante Faraday non usò mai il termine campo, dalla sua trattazione si percepisce che aveva una nozione molto vicina a quella moderna. Inoltre, sosteneva che le varie "Forze della Natura" note allora (l'elettricità, il magnetismo, la luce, la gravità...), si influenzassero fra di loro; parlava anche di "unità delle forze".

Oltre a Faraday, altra figura che guidò Maxwell nello studio dell'elettricità, fu William Thomson, futuro Lord Kelvin (1824-1907). Kelvin, che diede un contributo seppur indiretto alla teoria elettromagnetica della luce, non la apprezzava.

Maxwell era giunto alla conclusione che: "la luce consistesse di ondulazioni trasversali di quello stesso mezzo che era la causa dei fenomeni elettrici e magnetici".

Questa teoria si diffuse nell'Europa continentale grazie a due suoi grandi epigoni: Hertz che la portò in Germania ed Henri Poincaré (1854-1912) che la portò in Francia. Va infatti ricordato che la teoria elettromagnetica ebbe difficoltà a inserirsi nella fisica dell'epoca perché sembrava matematicamente difficile e aveva uno scarso supporto sperimentale. Veniva inoltre confrontata con molte altre teorie dell'elettricità basate sulle concezioni Newtoniane: le forze newtoniane sono istantanee, mentre Faraday e Maxwell avevano riscontrato una velocità di propagazione finita per la luce.

Fu Hertz probabilmente più di chiunque altro, a spronare l'accettazione della teoria elettromagnetica della luce. Allievo di Hermann von Helmholtz (1821-1894), Hertz fu capace di combinare la sua eccezionale capacità analitica alla sua straordinaria abilità di sperimentatore. Cercò sin da subito prove a favore della teoria di Maxwell, tentando nel contempo di collegarle alle teorie elettrodinamiche di Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) e di Franz Ernst Neumann (1798-1895). Hertz comprese che la verifica sperimentale, atta a provare l'esistenza delle onde elettromagnetiche, dovesse essere strettamente connessa con la frequenza di queste onde: trovò quindi nel 1886 un metodo per ottenere oscillazioni con frequenze molto elevate. Gli esperimenti che ne seguirono furono secondo Hertz la prova conclusiva della teoria di Maxwell⁵.

Righi riprese parte degli esperimenti di Hertz, li migliorò creando onde elettromagnetiche dalla lunghezza d'onda di solo qualche centimetro, in modo tale da poter meglio verificare tutte le proprietà ondulatorie di rifrazione, riflessione, polarizzazione e interferenza.

1.2. Biografia⁶

Augusto Righi nacque a Bologna il 27 agosto 1850 dal dott. Francesco Righi e Giuseppina Zanelli. Frequentò dapprima le scuole tecniche e successivamente l'istituto tecnico; al termine di questo poté accedere all'Università di Bologna portando a termine i quattro anni di studi a Matematica e poi integrando con l'anno presso la Scuola per Ingegneri, ottenendo così nel 1872 il diploma in Ingegneria Civile. Già a dicembre del 1871 fu nominato Assistente di Fisica nell'Università di Bologna, mentre nel novembre del 1873 succedette al suo insegnante Antonio Pacinotti (1841-1912) divenendo Professore di Fisica presso l'Istituto Tecnico di Bologna. A dicembre del 1875 divenne membro dell'Accademia delle Scienze di Bologna e nel novembre 1877 Libero Docente in Fisica nell'Università di Bologna. Successivamente, dopo aver vinto il concorso, divenne nel novembre del 1880 Professore Ordinario di Fisica nell'Università di Palermo. Qui stette fino al 1885 quando nel novembre divenne Professore di Fisica nell'Università di Padova. Solamente nel novembre del 1889 Righi riuscì a divenire Professore di Fisica nell'Università di Bologna. Nel 1897 fu uno dei soci fondatori della Società Italiana di Fisica. Nell'agosto 1898 divenne Socio Effettivo dell'Accademia dei Lincei. Il 4 marzo 1905 ricevette la nomina a Senatore del Regno d'Italia per meriti scientifici e didattici. Sempre in quell'anno, una rappresentanza della comunità scientifica composta da allievi, amici ma anche ammiratori, riunitasi in un Comitato decise di commemorare il venticinquesimo anniversario da insegnante universitario di Righi assieme alla inaugurazione dell'Istituto di Fisica, per solennizzare sia l'uno che l'altro. Inizialmente le celebrazioni erano previste per il 20 febbraio 1907, ma la festa slittò al 12 aprile dello stesso anno a causa del decesso di Giosuè Carducci avvenuto il 16 febbraio, che gettò nel lutto l'Ateneo.

Nel frattempo la fama di Righi crebbe ancora e negli ultimi anni il suo lavoro fu ricco di pubblicazioni. L'8 giugno 1920, a causa di un attacco cardiaco, venne a mancare mentre stava sottoponendo l'esperienza di Michelson e dunque la teoria della relatività, ad una critica sottile, per stabilire la sua compatibilità o meno con i principi della fisica classica¹.

In tutti questi anni fu protagonista attivo della comunità scientifica, membro di varie Accademie e Società. Oltre alle già citate Accademie delle Scienze di Bologna, Accademia dei Lincei e Società Italiana di Fisica, tra le altre ricordiamo: l'Accademia delle Scienze a Roma detta dei XL, l'Accademia di Padova, la Società degli Spettroscopisti italiani, la Società delle Scienze in

Mosca, la Società Filosofica di Cambridge, la Società di Fisica e Storia Naturale di Ginevra, la Royal Institution of Great Britain, la Royal Society di Edimburgo, l'Accademia di Boston, l'Accademia delle Scienze di Torino. Fu inoltre uno dei dodici Soci Onorari della Società di Fisica di Londra e membro onorario al posto di Lord Kelvin nella Reale Società delle Scienze di Upsala.

Righi fu ripetutamente contrassegnato da importanti riconoscimenti durante tutta la sua carriera scientifica: nell'agosto 1875 ricevette un premio di 1000 lire (corrispondenti a circa 4300€) dalla Accademia dei XL per le sue ricerche in elettrostatica; nel 1877 fu nominato Cavaliere della Corona d'Italia; nel 1878 ricevette la menzione onorevole dell'Accademia dei Lincei; nel 1886 gli fu assegnata la medaglia d'oro del Premio Matteucci (per il 1882) dalla Società Italiana delle Scienze; nel 1891 ottenne il Premio Reale dalla Accademia dei Lincei per i suoi studi sulle onde elettromagnetiche; nel 1892 fu nominato Cavaliere dell'Ordine di San Maurizio e Lazzaro; nel 1902 venne nominato Commendatore; nel 1905 divenne Cavaliere dell'Ordine Civile di Savoia, inoltre ricevette come premi la Medaglia al Merito Civile e la Medaglia e il Premio Hughes della Royal Society di Londra per *Experimental researches in electrical science*; nel 1912 ricevette assieme a Jean Baptiste Perrin il Premio Vallauri dell'Accademia delle Scienze di Torino per i suoi studi sulla materia radiante e sui raggi magnetici³. Sebbene dal 1905 al 1920 fu inserito ininterrottamente nella lista dei meritevoli per l'assegnazione del premio Nobel, questo non gli fu mai assegnato⁷; fu però citato in più occasioni durante le *Nobel Lectures* dei vincitori¹¹.

Ricordiamo infine alcuni riconoscimenti *Honoris Causa* ricevuti da Righi: nel 1899 fu nominato Dottore in Filosofia dall'Università di Gottinga; nel 1904 fu nominato Doctor in Law dall'Università del Wisconsin e nel 1907 Dottore dall'Università di Erlangen³.

1.3. Pensiero e impatto culturale

L'Istituto di Fisica voluto da Righi e inaugurato il 12 aprile 1907 è divenuto Dipartimento di Fisica nel 1982 e dal 2012 fa parte degli edifici appartenenti al Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna; ancora oggi è il luogo di formazione dei nuovi fisici dell'Ateneo.

Prima di questo i laboratori a disposizione erano privati oppure erano i *Gabinetti scientifici e disciplinari* della Accademia delle Scienze. Tra la fine dell'ottocento e l'inizio del novecento furono costruiti i vari edifici adibiti esclusivamente a uno specifico settore disciplinare, si pensi all'Istituto di Chimica voluto da Giacomo Luigi Ciamician. Ai giorni d'oggi questi edifici sono ancora parte integrante dell'Ateneo. In particolare quello di fisica oltre alle aule di lezione, alla biblioteca e al Museo, ospita anche docenti e ricercatori afferenti all'Università, all'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), al Centro nazionale delle tecnologie informatiche dell'INFN (CNAF), all'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), al Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC) e alla Sezione di Bologna dell'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF-OAS)⁸. Righi ideò questo luogo esattamente per adempiere a queste funzioni; in più in origine l'Istituto era dotato di un'officina, una falegnameria, dei laboratori sperimentali per l'ottica e la spettroscopia e dei laboratori didattico-scientifici⁶. Questi luoghi non sono più presenti perché i tempi sono cambiati, ormai gran parte dei Laboratori di ricerca sono frutto di collaborazioni internazionali (si pensi al CERN): non si ha più la figura del fisico sia teorico che sperimentale allo stesso tempo, avente quindi un proprio laboratorio in cui verificare le proprie teorie o quelle dei suoi colleghi. Uno degli ultimi scienziati a "tutto tondo", se così si può dire, è stato proprio Augusto Righi: estremamente versatile e capace di comprendere quasi ogni campo della fisica nota al suo tempo¹.

Questo è nettamente in contraddizione con la tendenza odierna a specializzarsi, a causa dello smisurato aumento delle scoperte e delle conoscenze nell'ultimo secolo, una conoscenza universale e approfondita di ogni particolare di ciascun settore della fisica attuale è praticamente impossibile. L'atteggiamento comune dei fisici si è profondamente trasformato in particolare nei due decenni successivi alla morte di Righi.

Questi << era anzitutto uno sperimentatore nato: accanto all'interesse, sempre prevalente, per il problema fisico da risolvere, accanto al gusto di progettare e realizzare il

dispositivo adatto per ogni problema, di eseguire e ripetere le osservazioni, variandole quanto occorre per acquisire la piena fiducia nel risultato, egli provava il gusto dell'esperienza in sé, della contemplazione del fenomeno >>¹.

Righi impostava le sue esperienze con uno scopo ben determinato per verificare o meno delle ipotesi teoriche, al fine di saggiarne la bontà; inoltre prima di trarne delle conclusioni era sua consuetudine sottoporre ogni suo risultato a una indagine critica¹.

Va aggiunto che per Righi le esperienze non avevano un valore esclusivamente scientifico, ma riconosceva in esse il valore pedagogico, didattico ed epistemologico; le sue lezioni erano infatti basate su una riproduzione in aula di qualche esperimento dimostrativo, atto ad agevolare la comprensione degli studenti. Questo lo notiamo chiaramente nel trascritto della lezione da lui tenuta in occasione dell'inaugurazione dell'Istituto di Fisica, dove trattò come argomento << quelle moderne vedute sulla costituzione della materia e sulla causa dei fenomeni del mondo fisico >>⁹: affrontò l'ipotesi della natura elettrica della materia << ricorrendo a qualche dimostrazione sperimentale, per abbreviarne e renderne chiara, per quanto possibile, l'esposizione >>⁹.

1.4. Principali contributi¹

Come anticipato in precedenza, Righi trattò una grande vastità di argomenti dando così un ampio contributo al progresso scientifico del suo tempo: dall'elettrostatica ai fenomeni legati all'ottica fisica, dalle scariche elettriche attraverso i gas alle proprietà elettroniche dei metalli, dalla meccanica delle oscillazioni agli effetti del campo magnetico, dalle onde elettriche ai raggi X, dalla radioattività alla relatività. Lo studio di alcuni di questi argomenti venne ripreso da Righi a distanza di anni, apportando ogni volta nuove idee e utilizzando le nuove nozioni nel frattempo acquisite.

La storia della fisica non deve ridursi a uno schema rappresentante solamente quelle scoperte rivoluzionarie e pietre miliari, il cui merito spesso viene attribuito interamente ai soli autori; ma deve costruirsi anche attraverso i contributi in positivo o infruttuosi che aiutano a determinare la strada più accreditata. Infatti ciò che noi oggi diamo per assodato e in qualche modo anche scontato, può avere invece richiesto un grande sforzo: molto spesso accade che le teorie attualmente sostenute, alla loro nascita erano considerate errate agli occhi dei più e molto spesso contrastate dalla comunità scientifica.

Prima fra le sue numerose pubblicazioni, datata 1872, è *"Sull'elettrometro ad induzione"*: in questa pubblicazione egli descrive un apparato capace di rendere sensibile un elettroscopio a cariche piccolissime. Tale artificio è una anticipazione di quello utilizzato nel 1929 da Robert Jemison Van De Graaff per il suo generatore. Successivamente Raymond George Herb in una forma più simile a quella originale di Righi, raggiunse come risultato la costruzione di un generatore di altissime tensioni, atto all'accelerazione di particelle cariche.

Nel 1877 Righi iniziò la sua ricerca e sperimentazione in ottica fisica tramite una serie di esperienze che lo portarono a dimostrare che la polarizzazione magnetica scoperta da Faraday sui corpi trasparenti è il risultato di una doppia rifrazione circolare, in analogia a quanto scoperto da Augustin-Jean Fresnel per la polarizzazione rotatoria del quarzo.

Qualche anno dopo Righi ideò delle esperienze per osservare il fenomeno dei battimenti con le onde luminose, secondo lui dovuto alla periodicità dei movimenti dell'etere in analogia a quanto accade col suono. Poi si spostò sullo studio teorico e sperimentale dell'effetto scoperto da Kerr di birifrangenza e dell'effetto Kerr magnetico. Il primo costituì una prima prova sperimentale a favore della teoria di Maxwell della luce vista come onda elettromagnetica: si

era individuata la birifrangenza della luce da parte di isolanti soggetti a campi elettrici; mentre il secondo effetto si può considerare una anticipazione dell'effetto Zeeman³.

Nel 1878 Righi trasformò il ricevitore di Bell in un altoparlante e costruì il primo microfono a polveri conduttrici: realizzò << il telefono che s'ascolta a distanza >> presentandolo anche alla Esposizione Universale di Parigi, questo fu inoltre l'unico brevetto richiesto dal Nostro¹⁰. Subito dopo le scoperte di Hertz, Righi si dedicò per alcuni anni ad approfondire le ricerche sulle onde elettriche e sulla loro ottica delle oscillazioni. Queste ultime probabilmente costituiscono il suo maggior titolo di gloria poiché tramite esse ha fornito un appoggio validissimo all'interpretazione elettromagnetica delle onde luminose. Per verificare le proprietà di rifrazione, riflessione, polarizzazione e interferenza, Righi comprese che le lunghezze d'onda di circa 65 cm (usate da Hertz) non erano adatte, così nel 1894 costruì un oscillatore a tre scintille capace di produrre lunghezze d'onda di 2.5 cm. Guglielmo Marconi nei primi trasmettitori per la telegrafia senza fili si servì proprio dell'oscillatore a tre scintille di Righi.

Negli stessi anni in cui Righi si diletta studiando l'ottica fisica e le scariche elettriche nei gas, iniziò a interessarsi dei problemi di magnetizzazione dei corpi. Per primo osservò il fenomeno dell'isteresi dell'acciaio e lo descrisse in una nota del 1880; ma in generale si tende ad attribuire la paternità del fenomeno a Otto Heinrich Warburg che nel 1881 lo descrisse in maniera più estesa ed elaborata. Questo fenomeno è fondamentale nelle nostre tecnologie poiché è alla base dei moderni sistemi di memoria degli Hard Disk³.

Nello stesso periodo Righi si interessò pure delle scoperte del fisico statunitense Edwin Hall, notò che l'effetto Hall era particolarmente accentuato nel bismuto: le sue ricerche lo portarono a definire il fenomeno noto come effetto Righi-Leduc.

Fra il 1887 e il 1888 Hertz scoprì che la tensione di scarica fra due elettrodi nell'aria si abbassa quando questi vengono illuminati con luce ultravioletta, Wilhelm Hallwachs fece così uscire delle osservazioni su questo fenomeno fissandone alcune particolarità: ipotizzò, senza però verificare, che la luce dava luogo a una separazione di cariche sulla superficie dei corpi interessati. Righi riprese subito lo studio del fenomeno scoprendo che una semplice lastra conduttrice si caricava positivamente quando scaricata, isolata e poi illuminata con luce ultravioletta. Hertz, Hallwachs e Righi si possono quindi considerare come gli scopritori sperimentali dell'effetto fotoelettrico; questo effetto fu ripreso solo nel 1900 da Philipp von

Lenard il quale lo pose nel vuoto, ma fu spiegato solo nel 1905 da Albert Einstein. Grazie al suo lavoro Einstein vinse il premio Nobel nel 1921 e in tale occasione, nel *Nobel Lectures*, citò Righi per il suo contributo dato alla conoscenza dell'effetto fotoelettrico¹¹.

Siamo sul finire degli anni novanta dell'ottocento quando ci furono le grandi scoperte dei raggi X, dell'effetto Zeeman e della radioattività. Righi affrontò lo studio dei raggi X e fece subito notare che essi provocavano la dispersione della carica elettrica da un conduttore nell'aria, indipendentemente dal segno della carica stessa; basandosi sulla determinazione della velocità di dispersione della carica, si possono quindi confrontare quantitativamente fra loro le intensità dei raggi X: è l'idea della camera di ionizzazione. Ideò un metodo semplice e alternativo che non necessitava dello spettroscopio per osservare l'effetto Zeeman in uno spettro a bande: questo rivelava sensibilmente la separazione delle righe spettrali prodotta dal campo magnetico. Nella lezione d'Inaugurazione dell'Istituto di Fisica Righi fece infatti vedere alla platea un effetto analogo ma relativo all'assorbimento e non all'emissione della luce per parte del gas: utilizzò due prismi di Nicol, una elettrocalamita e del sodio gassoso⁹. Nella stessa occasione Righi mostrò anche altri esperimenti tra cui quelli compiuti con i materiali radioattivi come l'uranite e il bromuro di radio; inoltre sulla base di ragioni di simmetria, senza dargli eccessivo peso, affermò << verosimilmente esistono elettroni negativi e elettroni positivi >>⁹, anticipando la scoperta di Carl Anderson del 1932 del positrone nei raggi cosmici, completata teoricamente l'anno successivo da Patrick Blackett e da Giuseppe Occhialini.

In un articolo del 1908 Righi elaborò matematicamente un esempio di un elettrone negativo immerso in un campo magnetico e in moto attorno a un corpo massivo molto pesante, di carica uguale ma opposta. Sebbene non indicò mai cosa questo dovesse rappresentare elettrodinamicamente, gli diede una rappresentazione matematica di tipo ellittico processionale, anticipando quella di Arnold Sommerfeld del 1915⁶.

In tutta la carriera Righi fu sempre interessato alle scariche elettriche nei gas; questo settore fu da lui prediletto per la varietà e complessità dei problemi e per la bellezza dei fenomeni; d'altronde è stato il campo che aprì la strada alle maggiori scoperte della fisica moderna. Alle scariche elettriche Righi ha dedicato oltre sessanta pubblicazioni su esperimenti di propria ideazione e su studi ripresi da esperienze a lui vicine. In generale quando riprendeva gli studi dei suoi colleghi, non si limitava a copiare semplicemente l'esperienza, ma si

preoccupava di impostare la ricerca in modo complementare, variando alcuni parametri. Quando nel 1880 Sir William Crookes pubblicò le sue nuove esperienze sul comportamento del catodo in prossimità di un gas molto rarefatto, Righi lo studiò a pressione ordinaria vedendo così dei fenomeni di "ombre". Queste furono definite da Righi "Ombre Elettriche" e si producevano con corpi, elettrizzati o meno, sottoposti a un campo elettrico in un gas a pressione ordinaria. Tali studi recarono un contributo fondamentale all'idea di esistenza di ioni nei gas, formulata in termini precisi da Wilhelm Giese nel 1882, ma che fece difficoltà ad affermarsi. Inoltre è possibile vedere le ombre elettriche come una anticipazione della fotocopiatrice e della xerografia inventata nel 1938 da Chester Carlson¹².

2. Ombre Elettriche

In questo capitolo analizzerò nel dettaglio le Ombre Elettriche. Mi soffermerò inizialmente sulle esperienze precedenti a quelle di Righi, realizzate da Joseph Wright of Derby (1734-1797) e da Wilhelm Holtz (1836-1893). Successivamente riporterò la spiegazione proposta da Augusto Righi, per poi soffermarmi sulle diverse configurazioni dell'esperimento.

2.1. Esperienze anteriori

Nell'articolo "*Le Ombre Elettriche*, Il memoria, del Professore Augusto Righi"¹³, vengono riportati i risultati ottenuti da Righi, relativi allo studio delle Ombre Elettriche. In prima analisi Righi riporta le esperienze di Wright¹⁴ e di Holtz¹⁵, sebbene esse siano differenti rispetto alle sue.

Il lavoro di Wright fu pubblicato alcuni anni prima rispetto a quello di Righi preso in esame. Egli utilizzò una macchina simile a quella che svilupperà Holtz (visibile in Figura 2.1) attorno al 1865; però a differenza di questa, quella di Wright era priva dei condensatori e i gli elettrodi erano posti a grande distanza.

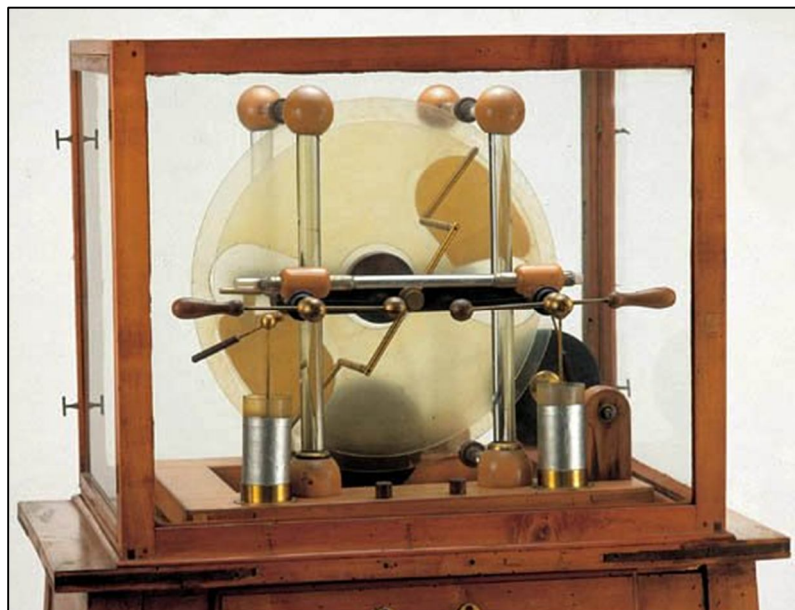


Figura 2.1: Macchina di Holtz¹⁶: In figura è rappresentata la macchina elettrostatica sviluppata da Holtz intorno al 1865. Essa è costituita da due dischi dal diametro distinto, coassiali. Il disco più grande è fissato mentre quello più piccolo può essere messo in rotazione grazie alla manovella. Inizialmente i dischi erano di vetro, verniciati con gommalacca. La macchina sfrutta i processi di induzione che avvengono tra le armature dei dischi e tra dei pettini posti frontalmente alle armature del disco mobile. I due elettrodi che acquisiscono carica opposta, terminano da un lato con una sferetta di ottone e dall'altro con un manico isolante; è possibile regolare a piacere la distanza fra le due sfere.

Attivato il dispositivo, le sfere dei due elettrodi assumevano carica opposta e sul polo che acquisiva carica positiva appariva una luce, come illuminato da quello negativo. Interponendo un oggetto fra i due elettrodi, compariva allora sul polo positivo l'ombra dell'oggetto, come se esso intercettasse la luce originata dall'elettrodo negativo. Al movimento dell'oggetto interposto corrispondeva una variazione di posizione e dimensione dell'ombra. Wright sosteneva che questa fosse diversa da una ombra ottica (Figura 2.2) in quanto i raggi che la producevano non erano rettilinei e tale ombra si formava anche quando l'oggetto veniva posto lateralmente rispetto la congiungente dei due elettrodi, come rappresentato schematicamente in Figura 2.3.

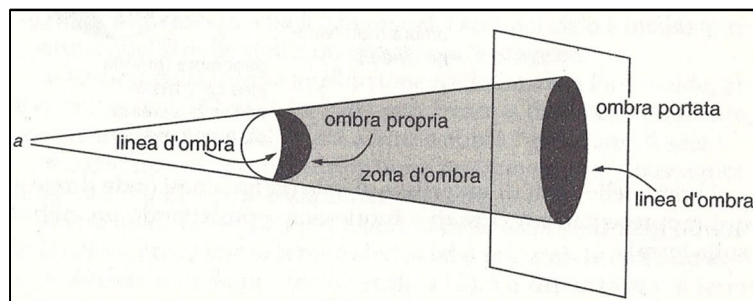


Figura 2.2: Ombra ottica¹⁷. In figura è rappresentata una ombra ottica, le linee che formano l'ombra partono rettilinee dalla sorgente luminosa, intersecano l'oggetto e vanno a delimitare sullo schermo l'ombra portata delimitata dalla linea d'ombra.

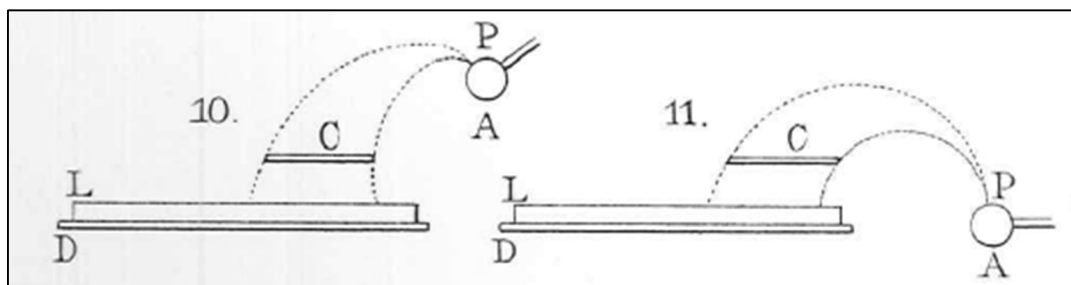


Figura 2.3: Tavola I Figura 10 e 11¹⁸. In figura è riportato lo schema delle linee di campo elettrico uscenti dal punto P della sfera A. Queste linee, a pressione ordinaria, rappresentano la traiettoria seguita dalle particelle di polvere che vanno a costituire il bordo dell'oggetto. Come si può notare, a differenza delle ombre ottiche, esse non sono rettilinee e l'ombra si forma anche quando l'oggetto C è posto lateralmente rispetto la congiungente dei due elettrodi P e D.

Anche Holtz riprese l'esperienza intrapresa da Wright, ma apportando alcune variazioni: innanzitutto migliorò il metodo per visualizzare le ombre utilizzando un pezzo di seta posto sopra un telaio di legno, per poi collocarlo sopra un elettrodo della macchina che prese da lui il nome (Figura 2.1); contemporaneamente all'altro elettrodo veniva data una forma appuntita.

Un altro metodo, ugualmente valido, consisteva nell'interporre il diaframma di seta tra i due elettrodi, conferendo ad entrambi una forma di punta. Durante l'attivazione della macchina, la seta presentava un chiarore sulla superficie e un oggetto posizionato fra un elettrodo e la seta era in grado di disegnare sopra a questa ultima la propria ombra.

Holtz osservò che un corpo isolante non produce ombra, mentre un semiconduttore e un conduttore la generano sempre; a influire maggiormente è la superficie rivolta verso la punta. Righi contrariamente ottenne sin da subito che sia un corpo isolante, da lui chiamato coibente, sia un conduttore erano in grado di mostrare una ombra.

Sconfessò dunque l'ipotesi di Holtz secondo la quale la scarica elettrica, che si propagava in maniera rettilinea, veniva assorbita o riflessa da un oggetto conduttore, mentre un corpo isolante era permeabile ad esso.

Holtz pubblicò più memorie riguardanti le ombre elettriche, ma come fece notare Righi, in più riprese egli modificò le proprie ipotesi.

Tra le varie ipotesi prese in considerazione da Holtz, nel suo secondo lavoro, egli giunse ad ammettere la stessa ipotesi di partenza di Righi: la produzione delle ombre era dovuta alle molecole d'aria elettrizzate e dunque respinte dalla punta. Queste dovevano muoversi secondo le linee di forza, dovevano risentire della reciproca repulsione e della carica dell'oggetto. Holtz in più aggiunse che i coibenti venivano attraversati dalle scariche in maniera maggiore rispetto ai conduttori, in questa maniera egli infatti tentava di spiegare le sue osservazioni secondo le quali gli oggetti isolanti non producevano ombre. Più difficile da interpretare era il motivo secondo il quale l'ombra non subiva significative variazioni quando l'oggetto veniva posto o meno in comunicazione col suolo. Righi spiegò dunque che Holtz utilizzava come oggetto coibente una croce di cartone, con angoli e spigoli vivi, che si riconduceva a un potenziale nullo anche quando isolata, a causa delle dispersioni dovute alle punte. Infatti Holtz osservò che presa una striscia di cartone, essa dava una ombra pressoché larga uguale sia quando posizionata di piano, sia quando posta di taglio. Per spiegare tale fenomeno, mutò nuovamente la propria ipotesi supponendo che qualsiasi oggetto esercitasse una repulsione sulle molecole d'aria in moto; ma un conduttore agiva maggiormente rispetto a un isolante. Righi intervenne nuovamente, motivando tale osservazione tramite la carica acquisita dal cartone per mezzo delle molecole d'aria respinte dalla punta.

Vengono illustrate da Holtz anche alcune tecniche per fissare le figure sulla seta tramite della polvere ottenuta dalla pianta del licopodio, contenente una alta percentuale di zolfo. Queste particelle potevano a seconda dei casi aderire all'ombra, al fondo, oppure produrre l'ombra sopra una lastra di ebanite precedentemente ricoperta con uno strato uniforme di tale polvere.

Successivamente Holtz apportò molte varianti all'esperienza e studiò le modifiche subite dall'ombra al variare del tipo di seta, del materiale sul telaio, delle forme dei conduttori e degli elettrodi. A queste varianti però si accompagnavano anche le sostituzioni delle varie ipotesi fatte in precedenza. Secondo Righi, nonostante le "ipotesi troppo spesso modificate"¹⁹, Holtz ebbe sempre una gran difficoltà a spiegare esaurientemente gli effetti dovuti ai vari casi.

2.2. Interpretazione di Righi delle ombre elettriche

Righi partì dall'ipotesi che le molecole d'aria elettrizzate siano messe in moto dalla scarica; si convinse che grazie a questa corretta supposizione iniziale, i fenomeni da lui osservati fossero deducibili senza rischiare di cadere in errore.

Produsse nuovi esperimenti, con diverse configurazioni, e dai lavori emerse che, indipendentemente dalla carica che l'oggetto poteva acquisire, l'ombra si produceva ugualmente, in quanto le molecole erano arrestate dall'oggetto interposto. L'ombra veniva prodotta anche quando l'oggetto interposto era scarico; ma se questo assumeva carica concorde o discorde a quella della punta, per repulsione o per attrazione si osservava un allargamento o un restringimento dell'ombra. Le ombre furono da lui ottenute:

1. Sopra lastre coibenti, proiettando su di esse un miscuglio di minio e zolfo in polvere, avendo cura di lasciare scoccare una sola scintilla dal condensatore;
2. Sopra lastre conduttrici, sulle quali in precedenza veniva depositato uno strato sottile e uniforme di polvere metallica, agendo in questo caso con scarica continua come Holtz;
3. Usando una scarica continua e polvere di lycopodio, proiettata durante la scarica;
4. Sopra delle lastre fotografiche, sempre con una scarica continua.

Prima di passare alla parte sperimentale, seguendo le orme di Righi, si analizzano alcune considerazioni teoriche riguardanti l'esperienza. In primis è utile riportare l'ipotesi di Crookes sul movimento di una particella elettrizzata con velocità iniziale nulla, libera di muoversi all'interno del suo omonimo tubo. Secondo la sua teoria, le molecole del gas caricatesi sull'elettrodo, venivano poi respinte in ogni direzione normale all'elettrodo stesso, seguendo quindi delle linee rette. Questa ipotesi riusciva a spiegare fenomeni come il concentrarsi al centro di un elettrodo a forma di calotta sferica di effetti quali la fosforescenza o lo sviluppo di calore. Eppure alcuni fisici, tra i quali Goldstein, mossero contro questa ipotesi gravi obiezioni.

Goldstein riuscì a dimostrare²⁰ che al centro di un elettrodo concavo, la regione fosforescente non era sempre puntiforme, ma in alcuni casi presentava la forma di un disco dal diametro soggetto a variazioni, in particolare dovute alla pressione del gas. Inoltre questo non distava mai esattamente quanto il raggio di curvatura, ma la distanza dipendeva dalla rarefazione del gas. Ammessa dunque la repulsione di particelle elettrizzate dell'elettrodo,

queste non si muovevano in linea retta, ma secondo le linee di forza²¹: sebbene queste ultime in generale siano sempre normali alla superficie dei corpi elettrizzati, poi possono proseguire anche non in linea retta. Altri fisici, tra cui Schuster od anche Ferrini e Pogliaghi nel "*La luminosità elettrica dei gas*", fecero osservare che in questo modo veniva trascurata la velocità iniziale della molecola, costituita in particolare dalla sua velocità termica.

Righi in particolare riteneva inesatte entrambe le ipotesi: sebbene si trascurasse la velocità termica e la velocità iniziale, le molecole elettrizzate non si muovevano né di moto rettilineo secondo la normale alla superficie dell'elettrodo, né secondo le linee di forza, ma percorrevano una traiettoria fra le due intermedia. Questo però non escludeva che i fenomeni generati all'interno del tubo di Crookes, non fossero dovuti a molecole elettrizzate e respinte dunque dall'elettrodo negativo. Righi trova una somiglianza tra i fenomeni così prodotti e quelli generati nella sua esperienza con punte alla pressione ordinaria; infatti spiega questi ultimi ammettendo il moto delle molecole aeree elettrizzate.

Le traiettorie delle particelle non possono seguire rigorosamente in ogni caso le linee di forza, mentre le forze che agiscono su di esse sono sempre dirette lungo le linee di forza e avranno due componenti: una tangenziale e una normale. Quindi la traiettoria percorsa sarà rettilinea solamente nel caso in cui anche le linee di forza saranno rettilinee e la particella sarà posizionata in un qualsiasi punto di tale linee.

D'altra parte la traiettoria seguirà la linea di forza solamente quando la forza applicata sulla particella avrà componente normale nulla; anche in questo caso ci ricondurremmo a una traiettoria retta. In generale la forza avrà sia la componente tangenziale, sia quella normale e questa ultima equilibra la forza centrifuga nel moto curvilineo.

Riprendendo le Tavole disegnate da Righi, in Figura 2.4 è rappresentata la prima immagine della Tavola I.

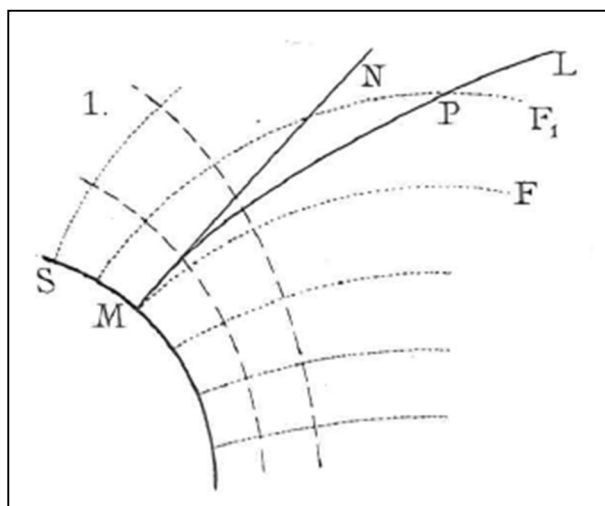


Figura 2.4: Tavola I Figura 1²². In figura è riportato lo schema di una superficie S di un corpo elettrizzato. Le linee tratteggiate sono le superfici equipotenziali, mentre le linee punteggiate sono alcune linee di forza. MN è la normale ad S in M , mentre MF rappresenta la linea di forza passante per M . ML è secondo Righi la traiettoria percorsa da una particella elettrizzata, se M è il suo punto di partenza.

S è la superficie del corpo elettrizzato, le linee tratteggiate sono le superfici equipotenziali; mentre quelle punteggiate sono alcune linee di forza. Prendiamo in considerazione una particella il cui punto M sia quello di partenza; MN sarà la normale ad S in M , MF invece è la linea di forza passante per M . ML è la traiettoria che percorrerà la particella e sarà compresa fra MN e MF e la sua concavità è rivolta dalla stessa parte delle concavità delle linee di forza, affinché in un qualunque punto P la forza tangente in P a PF_1 abbia le due componenti: la tangenziale e la normale diretta verso il centro di curvatura. Supponiamo ora che quando la particella si trovi nel punto P la sua velocità si annulli. Questa non potrà più proseguire lungo la linea PL , ma la sua traiettoria sarà compresa tra la linea di forza PF_1 e la tangente in P alla medesima linea di forza. Questa deviazione avverrà ogni qual volta alla particella verrà sottratta velocità. Questo effetto si ha quindi quando le molecole elettrizzate dall'elettrodo urtano reciprocamente fra loro. Se fossero da sole la loro traiettoria sarebbe rappresentata correttamente da ML ; mentre l'annullarsi della velocità dovuto agli urti con le altre molecole fa tendere la traiettoria alla linea di forza MF . Ne segue che tanto più gli urti sono frequenti, ovvero quanto maggiore è la pressione del gas, tanto più le traiettorie tenderanno a coincidere con le linee di forza. Anche in questo caso si stanno trascurando le velocità termiche, essendo queste dirette in tutte le direzioni possibili e molto minori delle velocità prodotte dalla repulsione elettrica.

Per un gas a pressione ordinaria gli urti reciproci fra le molecole sono frequentissimi, la molecola elettrizzata cede parte della propria carica alla molecola scarica; dunque è lecito assumere che le traiettorie percorse dalle particelle elettrizzate corrispondano alle linee di forza. Questo risultato fu infatti osservato da Righi nelle ombre da lui ottenute; anche se, come ricorda egli stesso, le traiettorie seguite dalle particelle per la proiezione delle ombre elettriche alla pressione ordinaria, non potranno esattamente coincidere con le linee di forza, infatti: gli urti non sono sempre centrali, è presente una velocità termica e le varie molecole elettrizzate risentono le une delle altre.

Al diminuire della pressione gli urti saranno sempre meno frequenti e di conseguenza le traiettorie si scosteranno sempre di più dalle linee di forza e tenderanno alle normali condotte dalla superficie del corpo elettrizzato.

Il ragionamento appena esposto è valido anche nel caso in cui la particella in questione sia un piccolo corpo solido. Una particella di polvere deposta sull'elettrodo, quando viene respinta da questo, si muoverà nell'aria e risentirà della sua resistenza; l'effetto sarà una sottrazione continua di velocità. Le particelle di una polvere finissima e leggera, una volta respinte tenderanno a seguire sensibilmente le linee di forza.

Righi osservò che le polveri elettrizzate potevano riprodurre le stesse ombre elettriche prodotte dalle molecole d'aria respinte dalla punta. Particelle di minio e zolfo che insieme costituiscono le polveri di Villarsy, inserite all'interno del campo elettrico generato tra i due elettrodi, si muoveranno sensibilmente lungo le linee di forza: il minio assunta carica positiva, si sposterà verso zone dove il potenziale è minore, mentre lo zolfo occuperà quei luoghi dove il potenziale è maggiore. Queste particelle possono inoltre venire arrestate dalla superficie di un isolante, fissandosi su di essa anche quando la superficie stessa non è carica. Bisogna dunque prestare attenzione durante l'utilizzo delle polveri di Villarsy a non attribuire una carica anche a quelle aree dove la polvere aderisce meccanicamente. Righi, per non cadere in errore, suggerisce di analizzare il fenomeno tramite il suo punto di vista innovativo, ovvero attraverso le linee di forza.

È doveroso sottolineare che nel caso di particelle materiali elettrizzate, le traiettorie sono indipendenti sia dalla loro massa, sia dalle loro cariche elettriche²³. Data una particella di massa m , carica elettrica e , velocità iniziale v_0 , nell'intervallo di tempo t si muove con velocità v

lungo la traiettoria che unisce il punto iniziale a potenziale V_0 e quello finale a potenziale V . Tale traiettoria ha raggio di curvatura ρ e taglia la normale alla superficie di livello V con un angolo α . R è la forza unitaria diretta secondo questa normale.

Si avrà allora:

$$m \frac{v^2}{\rho} = eR \sin \alpha$$

dal Teorema delle Forze Vive

$$mv^2 = mv_0^2 + 2e(V - V_0)$$

e quindi

$$\frac{1}{\rho} = \frac{eR \sin \alpha}{mv_0^2 + 2e(V - V_0)}$$

Preso l'elemento di traiettoria ds , l'angolo di contingenza $d\varepsilon$, ovvero la parte di piano compresa tra una circonferenza e la tangente in un suo punto, diviene

$$d\varepsilon = \frac{R \sin \alpha ds}{\frac{m}{e} v_0^2 + 2(V - V_0)}$$

Si osserva che se la velocità iniziale v_0 è proporzionale a $\sqrt{\frac{e}{m}}$ oppure è nulla, allora la deviazione subita dalla particella nel passare da una superficie di livello alla consecutiva, è indipendente sia dalla carica elettrica e , sia dalla massa m . Prese due particelle aventi massa e carica differenti, che partono da uno stesso punto con velocità iniziale nulla, essendo medesimo il primo elemento della traiettoria, allora anche i successivi saranno comuni e entrambe percorreranno la stessa traiettoria. In maniera analoga, ciò accade se le velocità iniziali delle due particelle considerate hanno la stessa direzione e sono proporzionali a $\sqrt{\frac{e}{m}}$.

La massa m e la carica e della particella influiscono solamente sulla velocità del moto lungo la traiettoria descritta. Dal Teorema delle Forze Vive si ha:

$$v^2 = v_0^2 + 2\frac{e}{m}(V - V_0)$$

A parità di massa la particella con carica maggiore avrà anche velocità maggiore, mentre a parità di carica elettrica avrà velocità maggiore la particella con massa minore. In entrambi i casi, la traiettoria percorsa sarà la stessa. L'illustre Prof. Beltrami, venerato maestro di Righi, gli fece

notare che queste considerazioni sono in realtà più generali: si possono applicare anche nel caso in cui le forze considerate non abbiano un potenziale ma siano indipendenti dal tempo.

Se la polvere utilizzata è omogenea e si suppone che le particelle abbiano una forma sferica e tutte lo stesso raggio, si può dimostrare facilmente che la velocità da esse acquistata è inversamente proporzionale alla radice quadrata del loro raggio. La carica elettrica e acquistata da una piccola sfera di raggio a posta a contatto con una sfera più grande di raggio b è proporzionale al quadrato del suo raggio²⁴: $\frac{\pi^2 a^2}{6b}$. Righi afferma che è possibile considerare la stessa proporzionalità anche nel caso in cui il conduttore non sia sferico, ma nel punto di contatto tra le due particelle il raggio di curvatura b sia molto maggiore di a . Inoltre la massa delle particella è proporzionale ad a^3 , allora $\frac{e}{m} \propto \frac{1}{a}$ e $v \propto \frac{1}{\sqrt{a}}$. Per determinare la traiettoria si devono integrare le equazioni del moto; si può già osservare anche a questo livello che avendo le linee di forza una debole curvatura, allora anche le traiettorie percorse avranno una debole curvatura: come verificato nella maggior parte delle esperienze fatte da Righi coi gas rarefatti. Partendo dalla superficie di un conduttore avremmo infinite normali ad essa, tutte possibili traiettorie. Inoltre ciascuna normale si interseca con infinite superfici di livello dalle quali partiranno altre normali ad esse; queste saranno dei possibili punti di partenza di particelle senza velocità. Avremmo così altri sistemi di traiettoria, tutti differenti.

Le particelle fino ora considerate non avevano dimensioni apprezzabili oppure non erano conduttrici e per questo non è stata presa in considerazione la variazione interna della carica elettrica durante il moto; ma nel caso in cui queste condizioni non siano presenti, allora deve essere considerata anche la dipendenza della carica dal raggio della particella.

Essendo in generale le dimensioni delle particelle considerate molto inferiori alle distanze tra esse e i corpi elettrizzati, è lecito assumere che esse siano omogeneamente cariche.

2.3. Ombre su lastre conduttrici

È possibile ottenere le ombre elettriche attraverso vari procedimenti. Un primo metodo descritto da Righi riproduce le ombre sopra una lastra conduttrice tramite l'utilizzo di polvere di ferro ridotto. L'apparato sperimentale è riportato schematicamente in Figura 2.5 e in Figura 2.6.

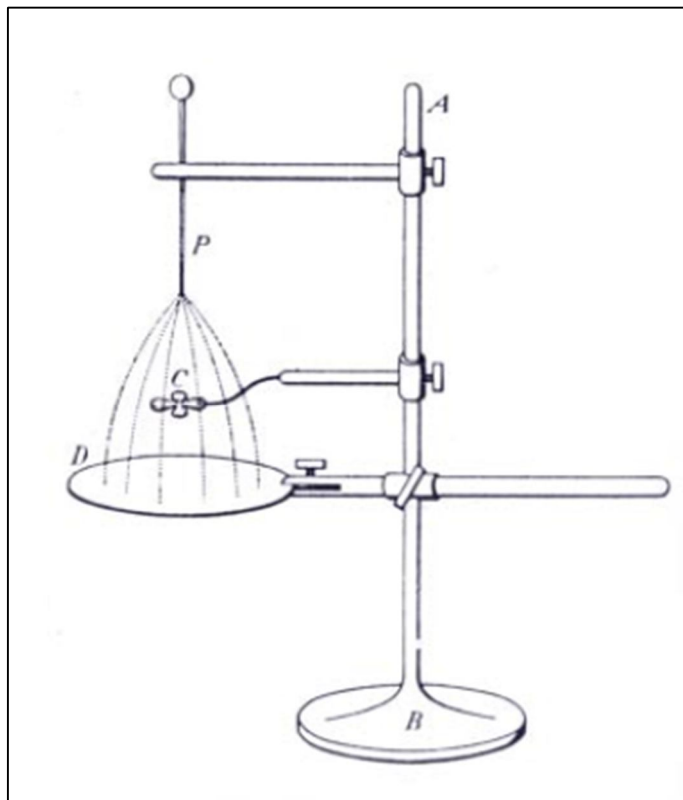


Figura 2.5: Apparato sperimentale³. In figura è riportato lo schema dell'apparato sperimentale utilizzato da Righi per riprodurre le ombre elettriche. Sul supporto AB sono fissati tre bastoni di ebanite: il primo regge una punta metallica P, avente una sfera nell'altra estremità; il secondo sostiene l'oggetto C del quale si vuole proiettare l'ombra e infine grazie a una biforcazione da parte dell'ultimo bastone di ebanite si posiziona il disco metallico D.

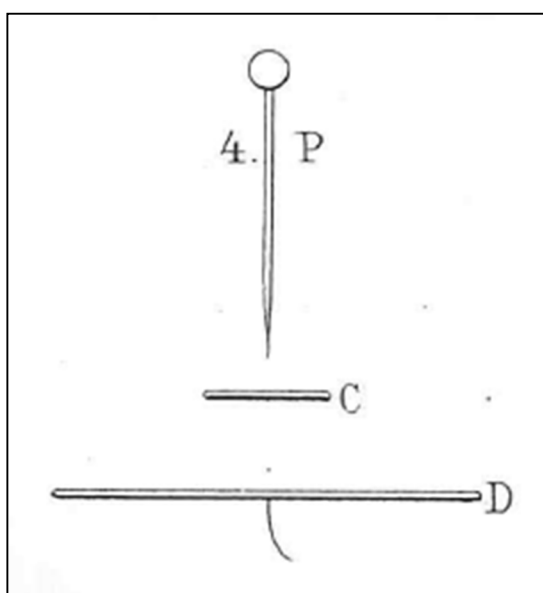


Figura 2.6: Tavola I Figura 4²⁵. In figura è riportato lo schema dell'apparato sperimentale utilizzato da Righi per ottenere le ombre elettriche. D è un disco conduttore posto in orizzontale e comunicante con uno dei due conduttori della macchina elettrica, mentre l'altro è connesso con la punta P posta perpendicolarmente sopra il disco. C rappresenta l'oggetto del quale si vuole proiettare l'ombra, viene dunque interposto tra la punta e il disco.

Oggetto principale delle ombre riprodotte da Righi è una croce ad angoli e spigoli smussati, riportata in Figura 2.7; in tal modo infatti viene ridotto l'effetto delle punte che fa scaricare l'oggetto e che potrebbe condurre a conclusioni errate come quelle tratte da Holtz sulla messa a terra o meno dell'oggetto.

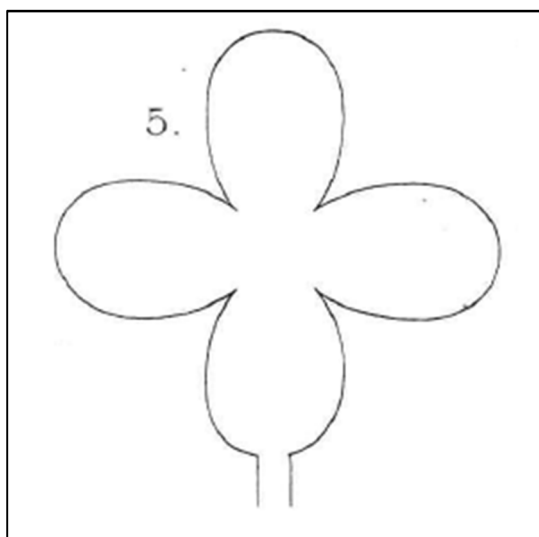


Figura 2.7: Tavola I Figura 5²⁶. In figura è riportata la croce ad angoli e spigoli smussati utilizzata per produrre le ombre elettriche, questa assomiglia a un quadrifoglio.

La punta P e il disco D vengono connesse ai conduttori della Macchina di Holtz. Fra essi viene interposto l'oggetto, conduttore o isolante; per migliorare l'esperienza e vedere più chiaramente l'ombra, si posiziona un foglio di carta sopra il disco. Su questo, con un setaccio finissimo, si sparge uniformemente uno strato sottile di polvere di ferro ridotto. Quando la macchina elettrica viene attivata si osserva il mutamento della figura dovuto allo spostamento della polvere. Il foglio di carta, se non eccessivamente sottile, si libera del ferro sia nella zona d'ombra che nel contorno, formando così il disco di fondo nel quale si può chiaramente osservare l'ombra dell'oggetto riportata in Figura 2.8.

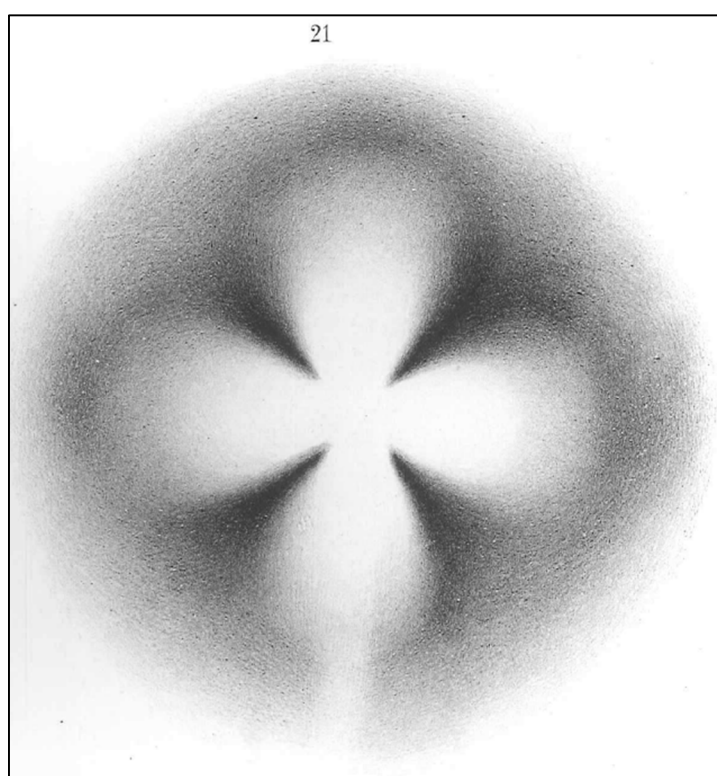


Figura 2.8: Tavola I Figura 21²⁷. In figura è riportata una delle ombre ottenute da Righi su lastre conduttrici tramite l'utilizzo di ferro ridotto e di una Macchina di Holtz per generare una scarica continua.

Righi ottenne che a parità di condizioni, le dimensioni del disco di fondo e dell'ombra variavano in base al segno della carica della punta e di conseguenza di quella del disco. Se alla punta veniva fornita una carica positiva, allora l'ombra diveniva più grande e il disco di fondo si rimpiccioliva; contrariamente con una carica negativa l'ombra si rimpiccioliva e il disco di fondo si allargava. Inoltre questo risultato non variava se il disco veniva messo in comunicazione col suolo.

Le molecole d'aria elettrizzate dalla punta cedono all'oggetto la loro carica, questo ben presto si elettrizza e ciò fa allargare l'ombra. La variazione di forma dell'ombra dipende dal materiale dell'oggetto e dalla forma di esso (presenza o meno di spigoli acuti e di punte).

Si può quindi approssimativamente affermare che le molecole d'aria, dopo essere state elettrizzate e respinte dalla punta, si muovono secondo le linee di forza.

In base ai risultati ottenuti da Righi la repulsione è maggiore quando la punta viene caricata negativamente. Come fu infatti spiegato dallo stesso Righi, le molecole colpiscono D secondo un disco più grande e di conseguenza l'ombra di C risulta più piccola: la repulsione che le molecole risentono è infatti maggiore per quelle la cui traiettoria è più lontana dall'oggetto, rispetto a quella risentita dalle molecole che lambiscono il suo contorno.

Questa repulsione si potrà apprezzare meglio utilizzando una lastra coibente; infatti nel caso analizzato in cui D sia un conduttore, la carica acquisita dalla punta affluisce sull'oggetto il quale si elettrizzerà sia quando è costituito da materiale conduttore ma isolato, sia quando è composto da materiale isolante. Si spiega così l'esperienza di Holtz, lui riscontrava una egual ombra ottenuta da una striscia di cartone posta prima in piano e poi di taglio. Contrariamente, quando la croce è di materiale conduttore e viene posta a un potenziale costante (per esempio connettendola con il disco, o la punta o la terra), si modificheranno significativamente le dimensioni e le forme delle ombre a causa appunto della repulsione agente sulle molecole in moto. È importante sottolineare che l'ombra viene riscontrata in tutti i casi citati, la difficoltà consiste nell'osservare una variazione significativa di forma e dimensione dell'ombra dovuta all'inversione di carica della punta.

Righi spiega tale esperienza tramite la repulsione delle particelle di ferro da parte di tutte quelle parti del disco D che non vengono colpite dalle molecole d'aria emesse dalla punta. Nelle zone di D colpite dalle molecole elettrizzate, la polvere di ferro viene scaricata e dunque rimane a formare il disco di fondo. L'ombra e il contorno del disco di fondo rimangono prive della polvere di ferro.

2.4. Ombre su lastre isolanti

Con l'esperienza delle ombre su lastre isolanti si manifesta in maniera migliore la repulsione tra le molecole. Per ottenere le ombre attraverso questo metodo si pongono alcune piccole modifiche all'apparato di Figura 2.6: sopra il disco metallico D si posiziona una lastra di legno, per esempio di ebanite. In alternativa è possibile utilizzare anche una lastra composta da altro materiale purché sia di natura isolante. La faccia inferiore di tale lastra si ricopre di stagnola e si connette D a terra e con una delle due armature di una Bottiglia di Leida. Per generare l'ombra Righi collega una pallina, analoga a quella annessa alla punta P , con la seconda armatura della Bottiglia di Leida; accosta così le due sferette in modo tale da fare scoccare una sola scintilla fra le due. Successivamente, per fare apparire l'ombra, rimuove la lastra e vi proietta la polvere di Villarsy.

Righi osservò che caricata negativamente la punta, l'ombra assumeva una colorazione uniforme gialla, era dunque formata dalle particelle di zolfo di suddetta polvere. Invece il disco di fondo veniva ricoperto dal minio, assumeva quindi una colorazione rossa: più sfumata al contorno e più intensa presso l'ombra. Un esempio delle ombre ottenute da Righi è riportato in Figura 2.9. Questa ombra in particolare fu ottenuta utilizzando due Bottiglie di Leida come condensatore, una lastra di ebanite e una croce di ebanite; ma come spiega Righi stesso è possibile variare a piacere le condizioni, senza che muti l'aspetto generale della figura.

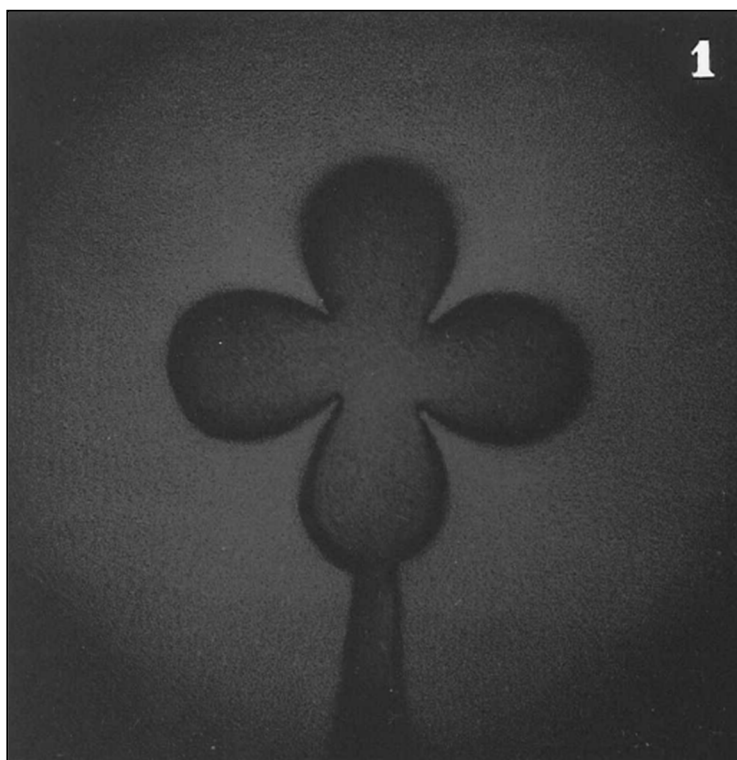


Figura 2.9: Tavola II Figura 1²⁸. In figura Righi riporta una delle ombre da lui ottenute su lastra di ebanite tramite un condensatore costituito da due Bottiglie di Leida e una croce di ebanite. Per ottenerla, la punta *P* è stata caricata negativamente ed è stata fatta scoccare una sola scintilla tra la pallina ad essa connessa e la pallina connessa alla armatura del condensatore.

Si osservò in particolare che invertendo la carica della punta e utilizzando una scarica debole, la posizione delle particelle di minio e zolfo si invertiva; inoltre aumentando l'intensità della scarica l'ombra diveniva frastagliata e irregolare. Un esempio ottenuto da Righi in condizioni analoghe alle precedenti è riportato in Figura 2.10.

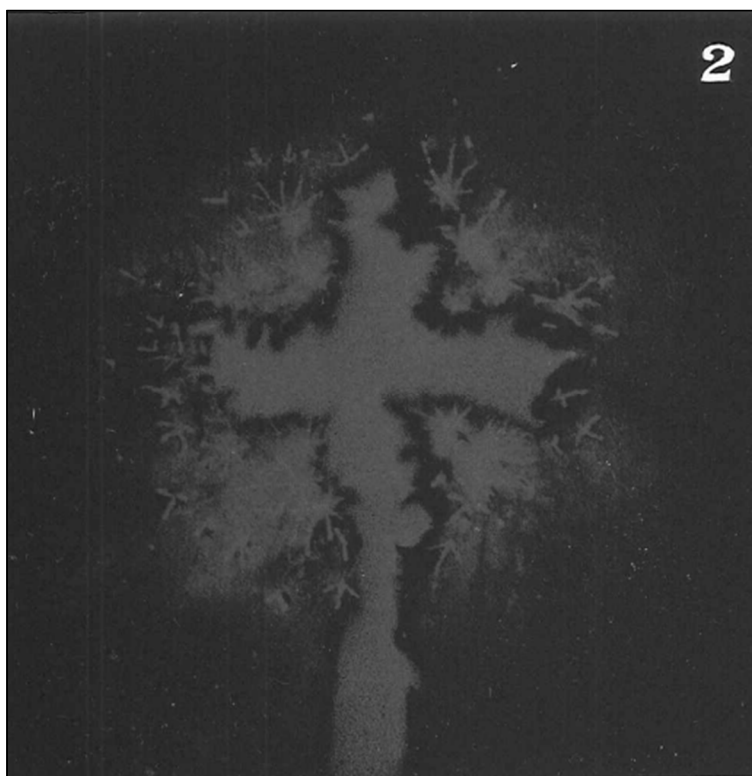


Figura 2.10: Tavola II Figura 2²⁹. In figura Righi riporta una delle ombre da lui ottenute su lastra di ebanite tramite un condensatore costituito da due Bottiglie di Leida e una croce di ebanite. Per ottenerla la punta *P* è stata caricata positivamente. Aumentando l'intensità della scarica si può quindi notare che l'ombra diviene irregolare e frastagliata.

Righi osservò dunque che quando alla punta *P* veniva fornita carica negativa, la regione d'ombra della figura veniva ricoperta dallo zolfo; invertendo la polarità l'ombra appariva formata dal minio. Questo risultato è dovuto alla carica indotta nell'armatura; infatti Righi afferma che con una lastra di ebanite spessa parecchi centimetri, o con una lastra sottile ma priva di armatura, distaccata e rialzata dal disco *D*, l'ombra appariva vuota o leggermente rossastra. Un esempio è riportato in Figura 2.11 dove l'ombra appare nera come la lastra di ebanite utilizzata.

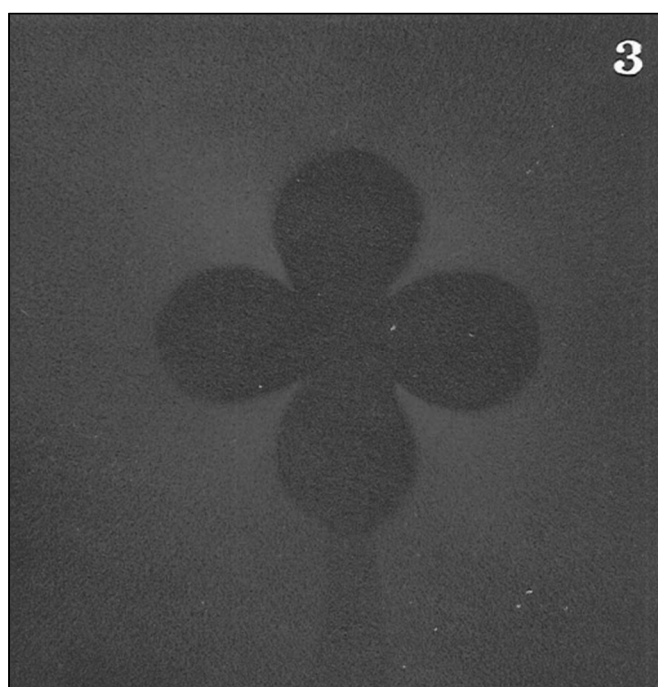


Figura 2.11: Tavola II Figura 3³⁰. In figura Righi riporta una delle ombre da lui ottenute su lastra di ebanite spessa. L'ombra in questo caso è priva di polvere e dunque assume la colorazione scura della lastra di ebanite.

Quando la croce utilizzata è coibente e per ottenere l'ombra si utilizza una sola scintilla, è lecito trascurare l'effetto prodotto dalla carica acquisita dalla croce stessa. Righi dimostra così che non è necessario che l'oggetto si elettrizzi affinché venga prodotta l'ombra, poiché si avrà comunque una intercettazione meccanica delle molecole da parte del quadrifoglio.

L'effetto di carica acquisita da parte dell'oggetto si manifesterà sempre maggiormente con l'aumentare del numero di scariche tra le due palline dell'apparato sperimentale. Sono due le ragioni principali spiegate da Righi che giustificano il modificarsi dell'ombra:

1. Le molecole d'aria elettrizzate durante le successive scariche risentono maggiormente della carica acquisita gradualmente dalla lastra di ebanite. Esse verranno respinte dalle regioni costituenti il disco di fondo e a causa della armatura della lastra attratte dall'ombra e dalle zone esterne del disco di fondo. Di conseguenza il disco di fondo tende ad allargarsi, mentre l'ombra tende a divenire sempre più piccola.
2. L'oggetto destinato a dare l'ombra, per esempio una croce di ebanite, si elettrizza già a partire dalla prima scintilla. Con lo scoccare delle scintille successive, in base alla carica acquisita, il quadrifoglio tenderà a respingere maggiormente le molecole in moto. Quindi l'ombra tende ad allargarsi così come tende ad allargarsi il diametro del disco di fondo.

In generale la prima causa prevale sulla seconda, per questo si può osservare che il disco di fondo tende ad allargarsi mentre l'ombra a restringersi fino a un certo limite dato dal bilanciamento delle due cause suddette. L'ombra è quindi il risultato della differenza di carica posseduta dalla lastra tra la regione in cui si forma l'ombra e quella in cui si forma il disco di fondo.

Righi osservò che la repulsione fra le molecole d'aria aumentava col crescere del potenziale con il quale veniva caricata la Bottiglia di Leida e all'aumentare della capacità di questa. Scariche più energetiche formano dunque ombre più piccole. Questa affermazione risultava verificata da Righi fino a quando il diametro della croce era più piccolo rispetto al pennacchio emesso dalla punta. Infatti le molecole più esterne, respingendo quelle passanti presso il quadrifoglio, costringono queste ultime ad avvicinarsi fra loro creando così una ombra più piccola. Contrariamente con scariche più deboli le molecole d'aria seguivano più fedelmente le linee di forza.

Molto interessante è l'ombra che Righi ottenne usando una lastra di ebanite forata al centro e disponendo la croce in modo tale che la punta P fosse perpendicolare alla congiungente tra due foglie del quadrifoglio e al foro della lastra. Come si può vedere in Figura 2.12 parte dell'ombra non si forma e lo zolfo forma un disco che circonda il foro della lastra. Infatti, dopo aver sufficientemente caricato il condensatore, Righi lo fece scaricare fra la punta P ed il disco D attraverso il foro praticato sulla lastra di ebanite.

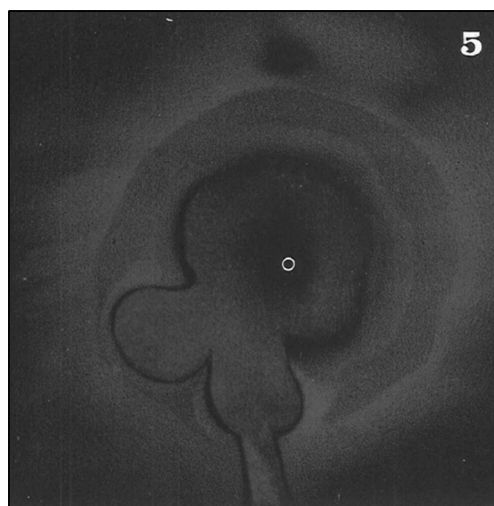


Figura 2.12: Tavola II Figura 5³¹. In figura Righi riporta una delle ombre da lui ottenute su una lastra di ebanite forata al centro. La punta P era stata caricata negativamente ed era posta perpendicolarmente alla congiungente di due foglie del quadrifoglio e al foro sulla lastra.

2.5. Ombre composte e ombre inverse

Quando l'elettricità passante dalla punta P alla lastra di ebanite può scaricarsi per mezzo della stessa, si formano le ombre che Righi chiama composte. Queste si ottengono anche involontariamente quando la punta è mal isolata; si formano però con certezza quando viene disposta una deviazione R nell'apparato sperimentale, come in Figura 2.13: questa deviazione può essere costituita da un tubo contenete dell'acqua distillata.

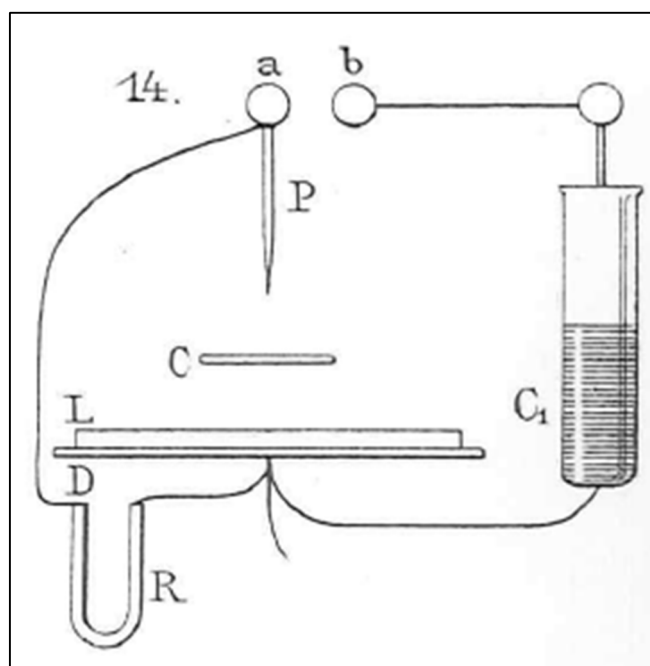


Figura 2.13: Tavola I Figura 14³². In figura è riportato lo schema dell'apparato sperimentale utilizzato da Righi per ottenere le ombre composte. D è il disco conduttore, comunicante con l'armatura esterna della Bottiglia di Leida C_1 . L'altra armatura del condensatore è connessa con la pallina b che si avvicinerà alla pallina a annessa alla punta P per far scoccare la scintilla. Sopra il disco metallico D viene posta la lastra L di ebanite, mentre C rappresenta l'oggetto del quale vogliamo proiettare l'ombra. In questa particolare configurazione è presente anche una deriva R composta da un tubo contenete dell'acqua distillata, questa deriva mette in comunicazione il disco D con la punta P .

Per fare apparire una figura perfetta, Righi suggerisce di utilizzare una lastra di ebanite spessa otto o dieci millimetri. In alternativa si possono sovrapporre più lastre per ottenere tale spessore, oppure si può utilizzare una lastra sottile priva di armatura nella faccia inferiore e distaccata una decina di millimetri dal disco D . Se la punta P viene caricata negativamente, l'ombra appare nera come l'ebanite, circondata dal minio leggermente rosso nettamente limitato; questo è a sua volta circondato da un anello intensamente colorato e sfumato verso l'esterno.

Il diametro dell'anello varia sia con l'intensità della scarica, sia con la distanza della lastra dalla punta: se questa è troppo distante, non si otterranno mai le ombre composte. Lo spessore della lastra di ebanite influisce direttamente sull'ampiezza degli anelli, così come la resistenza della deriva R .

Essendo molti i parametri da poter modificare, si avranno figure dal diverso aspetto; ma le caratteristiche principali di queste, in particolare la disposizione dei colori, sarà comune a tutte. Un esempio è riportato in Figura 2.14 dove si ha la presenza del minio fra l'ombra e l'anello; ma variando le condizioni suddette si può ottenere anche che esso venga ricoperto dallo zolfo solo in prossimità della croce, oppure interamente.

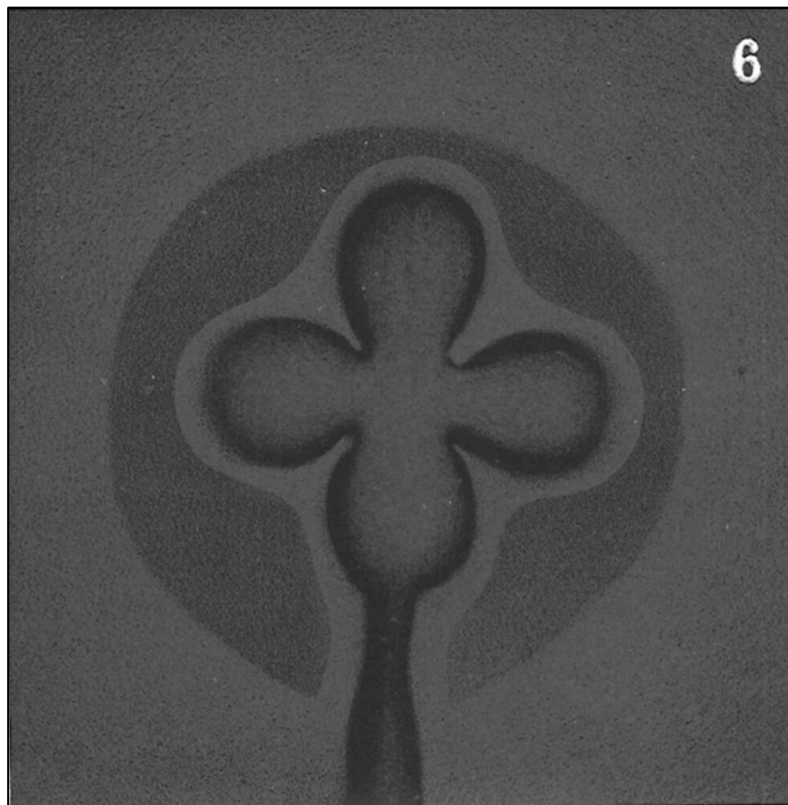


Figura 2.14: Tavola II Figura 6³³. In figura Righi riporta una delle ombre composte da lui ottenute. In questo caso l'intervallo fra l'ombra e l'anello è occupato da del minio.

Quando si utilizza una lastra molto sottile e armata, è probabile riscontrare delle macchie nella figura: queste sono causate dalle piccole scariche che avvengono fra la croce e la lastra di ebanite. Tali scariche divengono più numerose quando si riducono le distanze della punta P e dell'oggetto C dalla lastra L .

L'esempio riportato in Figura 2.15 è stato ottenuto da Righi caricando la punta P negativamente: l'ombra contiene diramazioni e i contorni sono irregolari come irregolare e frantumato è l'anello.



Figura 2.15: Tavola III Figura 3³⁴. In figura Righi riporta una delle ombre composte da lui ottenuta. Le macchie sono causate da scariche fra l'oggetto del quale si vuole proiettare l'ombra e la lastra di ebanite. Si notano chiaramente le diramazioni presenti nell'ombra, l'irregolarità dei contorni di essa e dell'anello; questo ultimo risulta anche frantumato.

Anche in questo caso invertendo la polarità della punta P si invertono i colori e quindi le zone occupate dal minio e dallo zolfo.

Se si fornisce alla punta una energia abbastanza elevata, nelle regioni più elettrizzate come l'orlo dell'ombra e l'anello, i contorni divengono meno netti risultando quindi diramati come in Figura 2.16, ottenuta da Righi senza derivazione R ma toccando la punta prima della proiezione delle polveri.



Figura 2.16: Tavola III Figura 2³⁵. In figura Righi riporta una delle ombre composte da lui ottenute caricando positivamente la punta P , in questo caso si può osservare che i contorni dell'ombra e dell'anello risultano diramati e meno netti. Per ottenerla invece della deriva R è stata toccata la punta precedentemente la proiezione delle polveri.

La derivazione R non è quindi sempre necessaria per ottenere le ombre composte. Un'alternativa alle configurazioni precedenti è quella di porre la derivazione R come in Figura 2.17: essa congiunge le armature esterne di due condensatori C_1 e C_2 aventi entrambi le stesse caratteristiche. La scintilla si avrà fra le due apposite sferette connesse alle armature interne dei già citati condensatori.

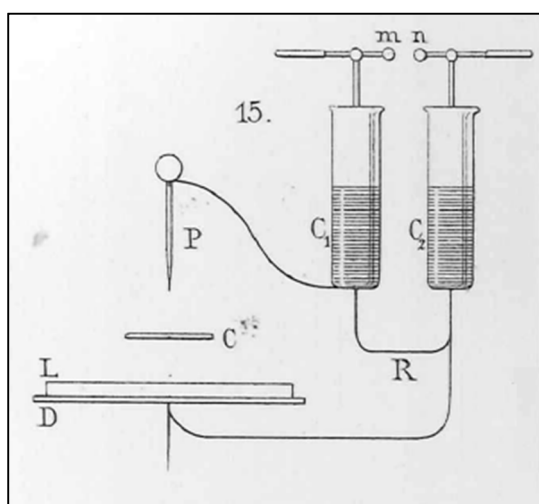


Figura 2.17: Tavola I Figura 15³⁶. In figura è riportato uno schema alternativo dell'apparato sperimentale utilizzato da Righi per ottenere le ombre composte. In questo caso la deriva R è posta congiungendo le armature esterne dei due condensatori C_1 e C_2 . L'ombra si ottiene quando si proiettano le polveri dopo che è scoccata una scintilla tra le palline m e n, connesse alle armature interne dei condensatori.

Dunque la causa principale delle ombre composte è lo scaricarsi della lastra d'ebanite. Senza derivazione o con un buon isolamento del sistema, si ottengono le ombre semplici descritte nei precedenti paragrafi; ma tramite essi si ha lo scaricarsi in parte della lastra per mezzo della punta. Quando la punta è carica negativamente l'effetto appena descritto equivale a una scarica positiva che segue quella negativa generata in origine dal condensatore e dunque più intensa. Per spiegarlo più efficacemente Righi si riferisce alla Figura 2.18: le due scariche opposte e successive produrranno ciascuna un'ombra non coincidente con l'altra. La prima scarica, negativa nel nostro esempio, è la più intensa e indurrà una carica negativa nelle regioni *ab* e *cd* mentre lascerà scarica l'ombra in *bc*. La seconda scarica è più debole, produrrà quindi una ombra più grande e verranno colpite dalle molecole d'aria le regioni *ef* e *gh* mentre sarà risparmiato l'intervallo *fg*. Dunque la carica negativa della prima scarica sarà ancora presente nelle regioni esterne *ae* ed *hd* e in quelle più intermedie *fb* e *cg*; mentre gli intervalli *ef* e *gh* saranno scarichi o debolmente carichi. L'anello che circonda l'ombra si forma in *ae* ed in *hd* mentre l'orlo dell'oggetto è formato da *fb* e *cg*. Durante la prima scarica l'oggetto è propenso a elettrizzarsi, la carica acquisita tende così ad opporsi alla formazione dell'orlo: l'orlo si forma se la carica acquisita è insufficiente a far coincidere i punti *f* e *g* con i punti *b* e *c* rispettivamente. Il caricarsi della croce si traduce quindi in un orlo più stretto.

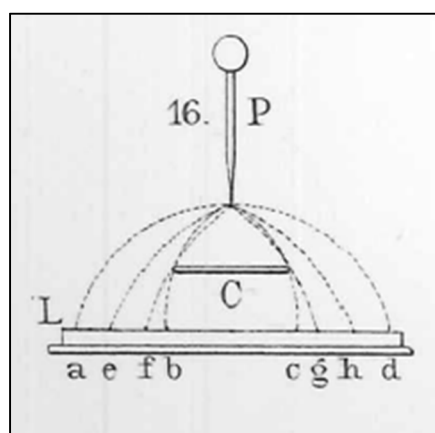


Figura 2.18: Tavola I Figura 16³⁷. In figura è riportato lo schema utilizzato da Righi per spiegare la formazione delle ombre composte. Con la prima scarica, dovuta quindi al condensatore, si caricheranno dello stesso nome della punta le regioni ab e cd. Con la seconda scarica, più debole e di segno opposto rispetto la precedente, dovuta allo scaricarsi della lastra per mezzo della punta, si colpiranno gli intervalli ef e gh. Come risultato si otterrà quindi una carica dello stesso segno di quella iniziale della punta P sia nelle regioni ae ed hd, le quali costituiranno l'anello che circonda l'ombra, sia nelle regioni fb e cg che vanno formare l'ombra della croce C. Questa ultima è elettrizzata dalla prima carica e l'orlo dell'ombra dell'oggetto risulterà così ridotto fino a quando i punti f e g coincideranno rispettivamente con b e c; in tal caso non avremmo più la formazione di tale orlo.

Quando al posto di una unica scarica se ne lasciano scattare più, si ottiene una figura con orli multipli circondata da vari anelli entrambi dovuti al susseguirsi di scariche con segno alternato. Tramite la configurazione della Figura 2.17, Righi ottenne tra le varie ombre quella riportata in Figura 2.19.

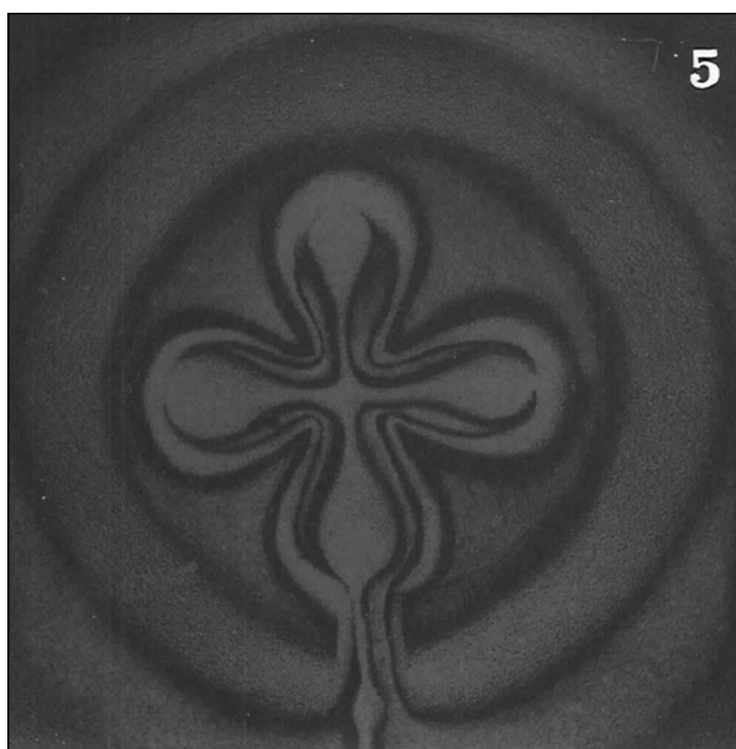


Figura 2.19: Tavola III Figura 5³⁸. In figura Righi riporta una delle ombre composte da lui ottenute, generata tramite l'apparato sperimentale disposto come in Figura 2.17 e con l'utilizzo di più scariche successive. Questo ha portato alla formazione di più orli e più anelli sulla figura.

Utilizzando una croce differente da quella di Figura 2.7, impiegata finora in questi esperimenti, in particolare scegliendo una croce più piccola e con spigoli più vivi come quella di Figura 2.20, invece delle ombre composte si ottengono le ombre inverse.

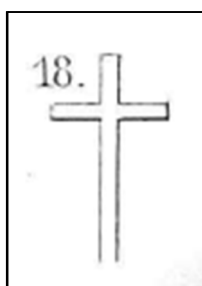


Figura 2.20: Tavola I Figura 18³⁹. In figura è riportata la croce ad angoli e spigoli vivi utilizzata da Righi per ottenere le ombre composte che divengono così inverse.

Le ombre inverse, come suggerisce il nome, hanno una colorazione invertita rispetto alle ombre ordinarie; ovvero fissata una data polarità, le regioni che dovrebbero essere occupate dal minio sono occupate dallo zolfo e viceversa. Quando le distanze tra la punta P e la lastra L diminuiscono notevolmente, l'orlo dell'ombra prende il sopravvento e una punta carica

negativamente dà così un'ombra composta dal minio e quindi di colore rosso; mentre se la carica di P è positiva l'ombra è gialla poiché composta dallo zolfo. Utilizzando una piccola croce come quella di Figura 2.20 composta da del cartoncino e isolata, le ombre divengono regolari e uniformemente colorate. Con una scarica iniziale debole non si ha lo scaricarsi successivo della lastra e quindi si genera l'ombra ordinaria descritta nei paragrafi precedenti. Aumentando progressivamente l'intensità delle scariche si ottengono una serie di figure diverse:

1. Inizialmente si ottiene l'ombra ordinaria come in Figura 2.21, la quale caricando la punta P negativamente è formata dallo zolfo mentre il fondo è composto dal minio.



Figura 2.21: Tavola III Figura 6⁴⁰. In figura si può osservare l'ombra ordinaria ottenuta da Righi utilizzando la piccola croce ad angoli e spigoli acuti di Figura 2.20.

2. Successivamente l'ombra diviene a poco a poco nera come in Figura 2.22, cioè assume la colorazione della lastra di ebanite sulla quale è proiettata.



Figura 2.22: Tavola III Figura 7⁴¹. In figura si può osservare il lento svuotamento dell'ombra di Figura 2.21.

3. Gradualmente l'ombra diviene rossa, ricoperta dal minio, circondata dall'anello rosso con un intervallo rossastro debole come in Figura 2.23.

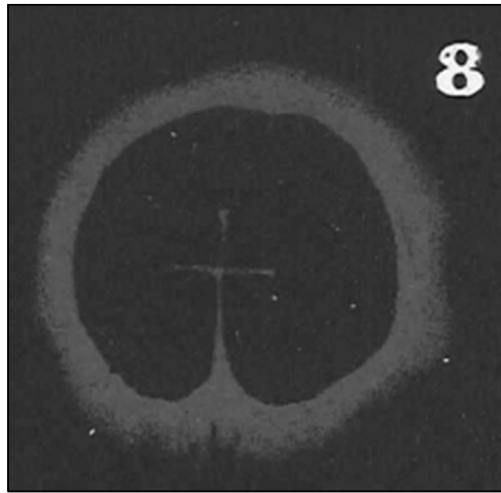


Figura 2.23: Tavola III Figura 8⁴². In figura si può già notare l'ombra inversa.

4. Infine ecco apparire l'ombra inversa come nel punto precedente, ma con dello zolfo nell'intervallo fra essa e l'anello come si osserva in Figura 2.24.

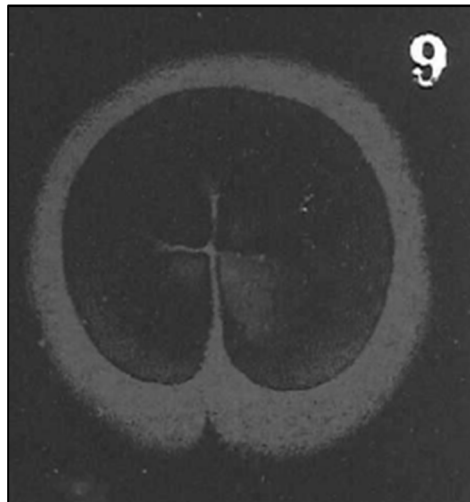


Figura 2.24: Tavola III Figura 9⁴³. In figura si osserva l'ombra inversa della piccola croce ad angoli e spigoli acuti di Figura 2.20, ottenuta da Righi tramite scariche successive sempre più intense.

3. Riproduzione in laboratorio

In questo capitolo finale illustrerò il fenomeno delle Ombre Elettriche con termini contemporanei e riporterò alcune delle ombre riprodotte dalla sottoscritta in laboratorio.

3.1. Rilettura in chiave moderna⁴⁴

La spiegazione proposta da Righi sul fenomeno delle ombre elettriche, non è troppo distante da quella che daremmo noi con termini contemporanei, utilizzando il concetto di campo elettrostatico e delle corrispondenti linee di campo. Il termine elettrostatico è utilizzato per sottolineare la situazione di staticità del campo elettrico.

In ambito classico, il campo è un ente fisico continuo che permea tutto lo spazio ed è capace di trasportare le perturbazioni delle cariche in esso immerse. In fisica classica quindi il campo elettromagnetico è l'unico descritto da una teoria di campo completa, si parlerà allora di cariche elettriche ed esso verrà descritto dalle equazioni di Maxwell.

Esistono due tipi di cariche elettriche elementari quantizzate: quella negativa, identificata con la carica dell'elettrone e quella positiva, associata alla carica del protone; esse differiscono appunto per il segno. Elettroni e protoni, assieme ai neutroni, sono i costituenti fondamentali dell'atomo. Un atomo è composto da un nucleo centrale attorno al quale orbitano degli elettroni e complessivamente la sua carica elettrica è neutra. Il nucleo è formato da un agglomerato di protoni e neutroni, tenuti assieme dal residuo delle interazioni forti dei quark up e down che li compongono; questo avrà una carica elettrica complessiva positiva, in quanto il neutrone ha carica neutra. Il numero di elettroni orbitanti attorno al nucleo dipende dunque dal numero atomico Z , il numero di protoni che lo costituiscono: tramite questo si identifica anche la specie chimica alla quale l'atomo appartiene.

In un sistema isolato elettricamente, la carica elettrica si conserva nel tempo. Per strofinio, ovvero mettendo a contatto due elementi diversi, per esempio sfregando una bacchetta di isolante con un panno di lana, è possibile strappare uno o più elettroni a un atomo donatore, questi saranno trasferiti a un altro atomo accettore. Complessivamente la carica elettrica totale del sistema si conserva, ma si sono ottenuti due oggetti aventi carica opposta e quindi atti ad attrarsi. Un altro tipo di elettrizzazione che può avvenire fra due oggetti è quella per induzione elettrostatica: in questo caso non si ha un contatto fra i due corpi, ma l'oggetto

avente già una carica elettrica, viene avvicinato all'altro; gli elettroni tendono a riorganizzarsi velocemente per ottenere in prossimità del corpo carico una concentrazione di carica, opposta a quella iniziale del corpo stesso. Anche in questo caso la carica elettrica totale del sistema è conservata in quanto il primo corpo rimane carico, mentre il secondo oggetto rimane complessivamente neutro.

Introducendo il concetto di campo elettrostatico, mettiamo in evidenza che un sistema di cariche perturba lo spazio circostante: una carica di prova q_0 , posta in loro prossimità, risente di una forza del tipo $\mathbf{F}(x, y, z) = q_0 \mathbf{E}(x, y, z)$, attribuita alla interazione con il campo elettrostatico stesso $\mathbf{E}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\tau} \frac{\rho d\tau}{r^2} \mathbf{u}$ (con ρ densità spaziale di carica, $d\tau$ elemento di volume elementare, \mathbf{u} versore e ϵ_0 costante dielettrica del vuoto), il quale persiste nello spazio anche in assenza della carica di prova. È inoltre possibile rappresentare graficamente il campo con un certo numero di linee, dette linee di campo o linee di forza: partendo da una generica posizione, spostandosi per tratti infinitesimi successivi, ciascuno parallelo e concorde al campo elettrostatico in quel dato punto, si ottiene una linea tangente al campo il cui verso di percorrenza è concorde col verso del campo. Le linee di campo sono uscenti da cariche positive e entranti in cariche negative; man mano che ci si avvicina alla sorgente del campo le linee si infittiscono, ciò indica che l'intensità del campo aumenta; le linee di forza non si intersecano mai in quanto ogni punto del campo è definito univocamente con una unica direzione.

Al campo elettrostatico è associata una forza conservativa, esso è infatti irrotazionale ($\vec{\nabla} \wedge \mathbf{E} = 0$) ed esiste un potenziale elettrico tale che $\mathbf{E} = -\vec{\nabla} V$. Il verso del campo indica sempre il verso nel quale il potenziale decresce. L'andamento del potenziale è visualizzabile ricorrendo alle superfici equipotenziali: sono quelle superfici nello spazio tridimensionale i cui punti hanno tutti lo stesso valore del potenziale. Queste non si intersecano e in un punto passa una e una sola superficie equipotenziale poiché il potenziale è una funzione univoca; inoltre le superfici equipotenziali risultano ortogonali alle linee di campo, si infittiscono nelle regioni in cui il campo è più intenso mentre sono equispaziate se il campo è uniforme.

I materiali conduttori, per esempio quelli solidi come i metalli, sono caratterizzati da alcuni elettroni di valenza debolmente legati e quindi in grado di muoversi. Quando si applica un campo elettrico opportuno, si può provocare un moto ordinato di tali elettroni dando così luogo a una corrente elettrica. Abbiamo però sottolineato che nei fenomeni di elettrostatica le cariche

sono fisse e questa condizione è verificata se all'interno di ogni conduttore, nello stato di equilibrio, il campo elettrico è nullo. Non si ha quindi un moto ordinato degli elettroni liberi in una direzione privilegiata rispetto agli ioni metallici considerati fissi. Questa condizione ha come conseguenza che: un eccesso di carica in un conduttore si distribuisce solo sulla superficie esterna di questo; il conduttore ha potenziale costante in ogni suo punto e quindi la sua superficie è equipotenziale e infine le linee di campo intersecano perpendicolarmente la superficie del conduttore. Deriva da queste condizioni anche l'effetto delle punte: le cariche elettriche si dispongono con densità maggiore dove il raggio di curvatura è minore, nelle regioni con punte si ha quindi una probabilità maggiore di avere una scarica.

Un conduttore posto all'interno di un campo elettrico ne modifica le linee di campo, esse infatti devono essere perpendicolari alla superficie del conduttore; contrariamente è noto che un oggetto isolante non le modifica.

Quando fra due conduttori avviene il fenomeno di induzione completa, ovvero tutte le linee di campo uscenti dal primo terminano nel secondo, siamo in presenza di un condensatore e i due conduttori prendono il nome di armature del condensatore. La geometria delle facce del condensatore e il mezzo interposto fra esse, determinano la capacità del condensatore, questa è definita come il rapporto tra la carica di un'armatura e le d.d.p. tra le armature stesse. Dato un particolare condensatore, avente quindi determinate caratteristiche geometriche e di costruzione, la sua capacità è costante. Il processo attraverso il quale si passa da una carica nulla sulle armature del condensatore, a una carica $+q$ e $-q$, detto processo di carica del condensatore, richiede un lavoro di separazione delle cariche: essendo il campo conservativo, questo lavoro sarà una funzione di stato e dipenderà esclusivamente dallo stato iniziale e da quello finale. Dunque il lavoro dipende solamente dalla carica trasportata e dalla capacità del condensatore; inoltre viene immagazzinato nel sistema sotto forma di energia potenziale elettrostatica. Assumendo che l'energia sia nulla quando la carica q è nulla, allora abbiamo che l'energia potenziale è uguale al lavoro. È possibile anche trovare una espressione alternativa dell'energia, legata al campo prodotto dal sistema di cariche, invece che alle sorgenti del campo stesso. Si deve ipotizzare l'energia come distribuita nei punti in cui c'è il campo, si può allora introdurre la densità di energia elettrostatica come l'energia elettrostatica per unità di volume e vale la formula generale: $u_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$.

Le due armature del condensatore hanno una carica uguale in valore, ma di segno opposto; allora tra queste si eserciterà una forza attrattiva. La forza per unità di superficie è detta pressione elettrostatica, essa coincide con la densità di energia elettrostatica sulla superficie del conduttore.

Un materiale isolante è un materiale la cui carica elettrica prodotta per strofinio non è libera di muoversi; infatti tutti gli elettroni sono saldamente legati agli atomi e non si allontanano da essi spontaneamente. Si chiamano dielettrici quei particolari tipi di isolanti che interposti in un condensatore ne riducono la d.d.p. delle armature e quindi il campo elettrico. Quando inserisco un dielettrico in un campo elettrico, cioè lo sottopongo all'azione di un campo elettrico esterno, si ha solamente uno spostamento locale delle cariche costituenti gli atomi; ovvero il materiale si polarizza. Le scintille nell'aria, o più in generale le scariche in un dielettrico, si formano quando si oltrepassa il valore della rigidità dielettrica, definita come il massimo valore del campo elettrico, applicabile al materiale isolante prima che avvengano scariche al suo interno.

Le equazioni locali di Maxwell per il campo elettrostatico nel vuoto sono:

- $\vec{\nabla} \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$
- $\vec{\nabla} \wedge \mathbf{E} = 0$

Dalle quali posso ottenere le equazioni globali:

- $\oint_{\Sigma} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \frac{Q}{\varepsilon_0}$
- $\oint_{\Gamma} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r} = 0$

Ma nel nostro caso l'esperimento avviene in un comune laboratorio, non si è praticato il vuoto attorno all'apparecchiatura, pertanto stiamo agendo a pressione standard. Quindi dobbiamo considerare l'aria come un dielettrico. In questo caso definiamo: la costante dielettrica assoluta $\varepsilon = \kappa \varepsilon_0$, con κ costante dielettrica relativa; il vettore polarizzazione del dielettrico $\mathbf{P} = \varepsilon_0 (\kappa - 1) \mathbf{E}$ e il vettore di induzione dielettrica $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$. Possiamo così riscrivere la legge di Gauss, prima delle equazioni di Maxwell, come: $\vec{\nabla} \cdot \mathbf{D} = \rho_L$, dove ρ_L è la densità di carica elettrica libera ed è assente in un dielettrico.

L'ombra prodotta dalla croce ad angolo e spigoli smussati deriva dal fatto che la polvere di ferro viene attratta e quindi si distribuisce in quelle regioni del disco direttamente colpite dalle linee di campo uscenti dalla punta. Queste vengono modificate dal quadrifoglio che inoltre scherma in parte la regione sottostante a se stesso.

Contrariamente l'ombra prodotta con una croce di materiale isolante, è dovuta alla carica che le particelle acquisiscono quando vengono soffiate: parte di esse vengono arrestate meccanicamente dell'oggetto, mentre altre, seguendo le linee di campo si dispongono formando l'ombra.

3.2. Apparato sperimentale

L'apparato sperimentale utilizzato in laboratorio consiste in un sostegno nel quale si posizionano il disco metallico, l'oggetto del quale si vuole proiettare l'ombra e una punta terminante da un lato con una sfera come si può vedere in primo piano di Figura 3.1 e di Figura 3.2. In entrambe è stato posizionato sopra il disco un foglio di carta sul quale si potrà vedere l'ombra proiettata. Come si può notare osservando le figure, nella prima l'apparato sperimentale è collegato alla macchina di Wimshurst, mentre nella seconda è collegato al generatore di Van De Graaff. In quest'ultima figura tra il disco metallico e il foglio di carta è posizionata una lastra in legno.

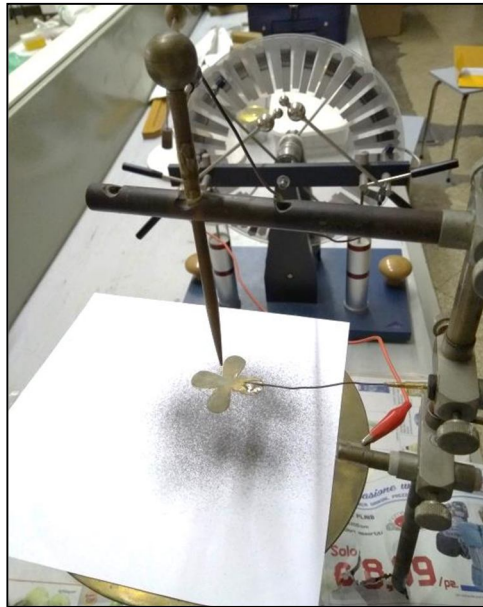


Figura 3.1: Apparato sperimentale connesso alla macchina di Wimshurst. In figura è possibile osservare una foto dell'apparato sperimentale, sopra il disco metallico è appoggiato un foglio di carta nel quale è già stato steso uno strato sottile di polvere di ferro. In secondo piano si può notare la macchina di Wimshurst collegata tramite dei coccodrilli al disco e alla punta.



Figura 3.2: Apparato sperimentale connesso al generatore di Van De Graaff. In figura è possibile osservare una foto dell'apparato sperimentale, sopra il disco metallico è appoggiato una lastra di legno sulla quale è posizionato un foglio di carta. In secondo piano si può notare il generatore di Van De Graaff collegato tramite dei coccodrilli al disco e alla punta.

Come oggetto del quale si vuole proiettare l'ombra è stata usata una copia delle croce ad angoli smussati di Righi, avente la stessa forma, visibile in Figura 3.3.

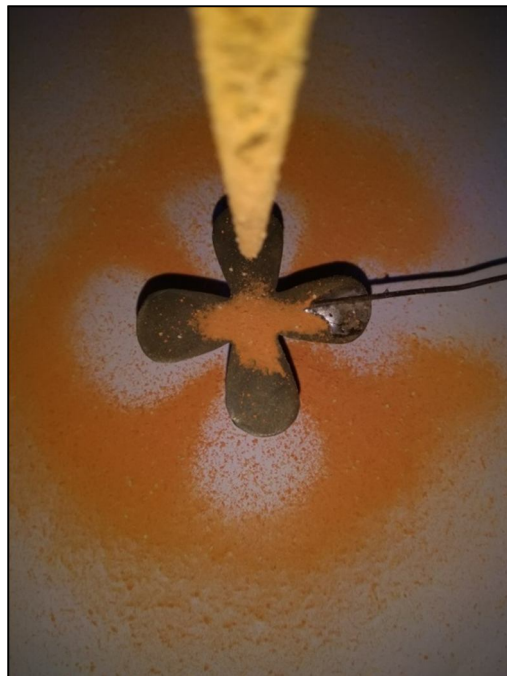


Figura 3.3: Zoom su punta e quadrifoglio dopo la proiezione di minio e zolfo in polvere. In figura è possibile osservare l'ombra della croce ad angoli smussati ottenuta tramite la proiezione della polvere di Villarsy.

Le polveri utilizzate sono quelle di ferro, di minio e di zolfo. Le prime sono state stese sul foglio di carta tramite un colino, mentre le seconde sono state proiettate grazie a un soffietto per polveri in plastica dalla punta metallica (Figura 3.4) in modo tale che le particelle di polvere si elettrizzassero per strofinio.



Figura 3.4: Soffietto per polveri in plastica dalla punta metallica. In figura è possibile osservare la foto del soffietto per polveri utilizzato per proiettare la particelle di minio e zolfo. Esso ha la punta metallica per poterle fare elettrizzare per sfregamento.

L'esperienza principalmente è stata eseguita collegando l'apparato sperimentale alla macchina di Wimshurst (Figura 3.5); a tal proposito si vuole ringraziare il prof. Romano Serra che mi ha reso disponibile oltre al laboratorio, la macchina in questione appartenente al "Museo del Cielo e della Terra" di San Giovanni in Persiceto (BO).

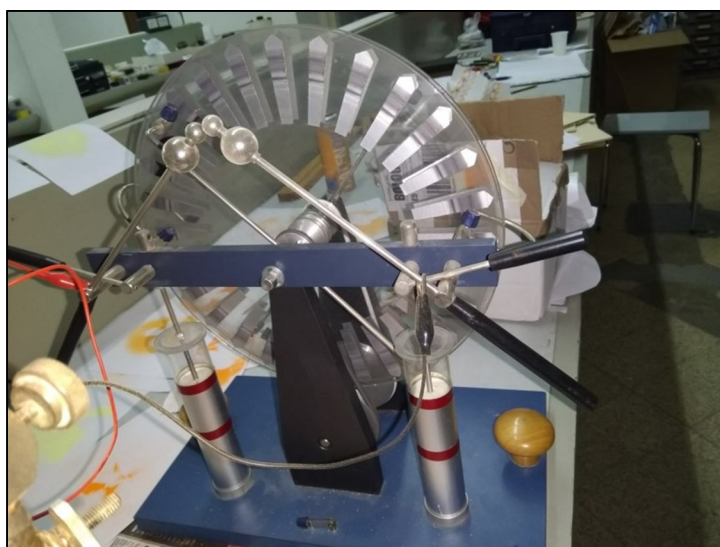


Figura 3.5: Macchina di Wimshurst con due Bottiglie di Leida. In figura è possibile osservare la foto della macchina di Wimshurst appartenente al "Museo del Cielo e della Terra" di S. Giovanni in Persiceto.

La macchina è costituita da due dischi aventi la stessa dimensione, sopra di questi sono posizionate delle strisce di carta stagnola. Lateralmente sono montate delle spazzoline di rame. Quando i dischi vengono messi in rotazione tramite l'apposita manovella, l'uno ruota in verso opposto rispetto all'altro. Grazie al contatto con le spazzole di rame che strappano le cariche elettriche dalle parti di alluminio, la macchina si carica e nel nostro caso fornisce una d.d.p. tra la punta e il disco che sono ad essa collegati. Terminato l'esperimento è importante fare attenzione a scaricare l'intero apparato prima di toccarlo: per fare ciò si avvicinano le aste degli elettrodi. Le estremità di questi sono a forma di doppia sfera e si può vedere scoccare una scintilla fra esse.

La macchina di Wimshurst ha caratteristiche elettriche molto simili alla macchina di Holtz utilizzata da Righi per ottenere le sue ombre elettriche. In alternativa è possibile utilizzare il generatore di Van De Graaff riportato in Figura 3.6.



Figura 3.6: Generatore di Van De Graaff. In figura è possibile osservare la foto del generatore di Van De Graaff.

La polvere di ferro ridotto utilizzata nell'esperimento e avente colore grigio, è identificata col numero CAS 9439-89-6, la formula chimica rilasciata dal venditore è Fe (min.99.5%) e la frazione passante al setaccio è d90 90µm.

Il minio in polvere deriva dall'ossido di piombo, la sua formula chimica è $2\text{PbO} \cdot \text{PbO}_2$, ha un tipico colore rosso aranciato. Data la sua origine, è un elemento che può nuocere all'uomo se non maneggiato con la dovuta cautela; le indicazioni di pericolo sono: H302 + H332, H360, H362, H370, H410 e H351 (sospettato di provocare il cancro). Pertanto è importante utilizzare le dovute precauzioni di sicurezza e i dispositivi di protezione individuale; in particolare si raccomandano le istruzioni: P263, P273, P280, P308 + P313, P405 e P501.

Infine la polvere di zolfo, dal tipico colore giallo pallido, è identificata col numero CAS 7704-34-9, la formula chimica è S (min.99.95%), la frazione passante al setaccio è D90 45µm. Nel maneggiare questa polvere bisogna fare attenzione: essa infatti ha un codice di pericolo H315 poiché può provocare irritazioni della pelle e le istruzioni di sicurezza raccomandate sono P302 + P352 dove in caso di contatto con la pelle bisogna lavare la zona interessata con molta acqua e sapone.

3.3. Ombre con ferro in polvere

Soffermiamoci momentaneamente sulle ombre ottenute in laboratorio con polvere di ferro ridotto e scarica continua. L'oggetto utilizzato è la già citata croce ad angoli e spigoli smussati, schematizzata in Figura 2.7 e visibile in Figura 3.3. Si posiziona dunque la punta sopra al centro del quadrifoglio e tramite dei coccodrilli si connettono alla macchina di Wimshurst la punta e il disco, in modo tale da caricare la punta positivamente. Un esempio delle ombre ottenute in questa configurazione è riportato in Figura 3.7, come si può osservare il disco di fondo è appena accennato, mentre le fessure distanziate i lobi del quadrifoglio sono nell'ombra marcate e apprezzabili.

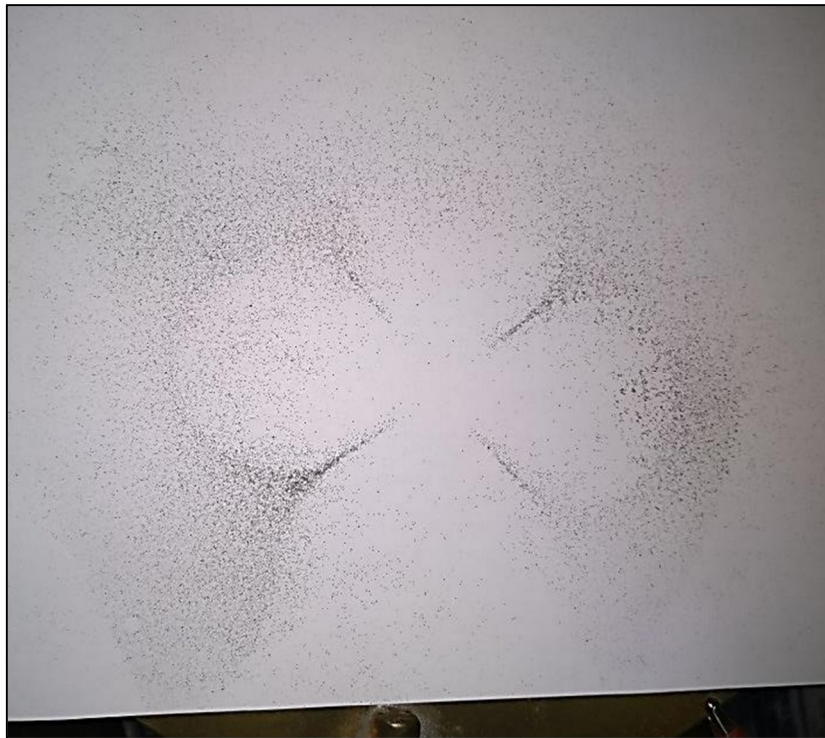


Figura 3.7: Ombra con polvere di ferro su disco metallico carico negativamente. In figura è riportata la foto di una delle ombre da me ottenute con polvere di ferro sparsa uniformemente sopra un foglio di carta adagiato sul disco. In questo caso la punta è stata caricata positivamente ed è possibile apprezzare nell'ombra lo spazio tra i lobi del quadrifoglio.

Utilizzando una configurazione analoga, ma invertendo fra loro i coccodrilli e dunque dando alla punta carica negativa, si può osservare un disco di fondo più marcato e dal diametro maggiore con un'ombra più piccola nella quale si è perso in parte il dettaglio di separazione tra i rami della croce. Un esempio è riportato in Figura 3.8.

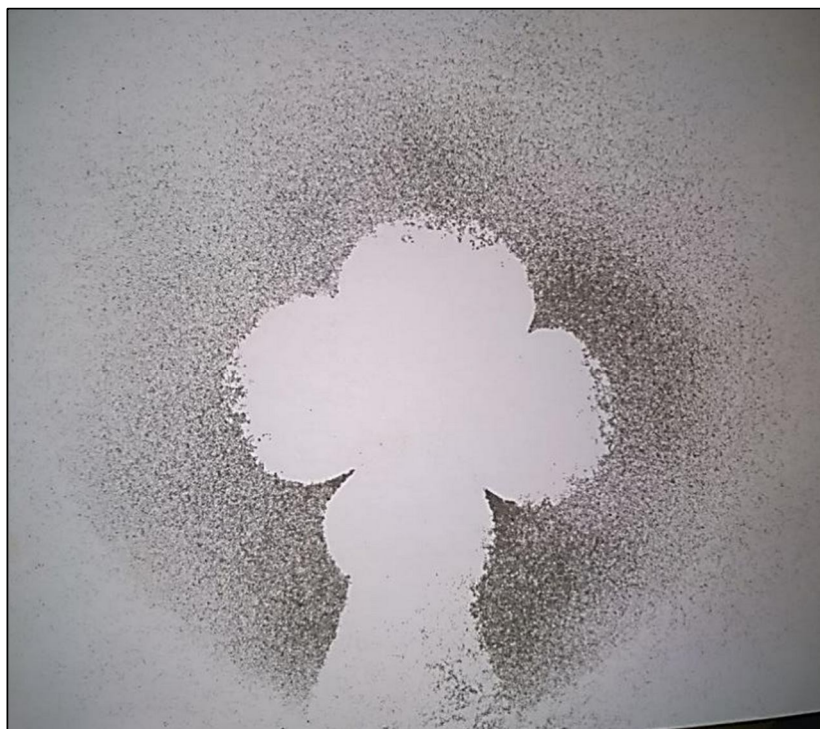


Figura 3.8: Ombra con polvere di ferro su disco metallico carico positivamente. In figura è ripotata la foto di una delle ombre da me ottenute con polvere di ferro sparsa uniformemente sopra un foglio di carta adagiato sul disco. In questo caso la punta è stata caricata negativamente ed è possibile apprezzare un disco di fondo ben marcato.

Si apporta ora una maggiore modifica alla configurazione e si interpone tra il disco e il foglio una lastra di legno spessa qualche millimetro, avente la faccia inferiore (quella a contatto col disco) ricoperta con un foglio di alluminio. Una delle ombre così ottenute è visibile in Figura 3.9: essendo la punta caricata negativamente, anche in questo caso si può notare un disco di fondo ampio e una ombra piccola. Inoltre dopo aver prodotto l'ombra, nel momento di spostare il foglio con sopra essa, si è riscontrata una certa attrazione tra il foglio stesso e la lastra di legno.

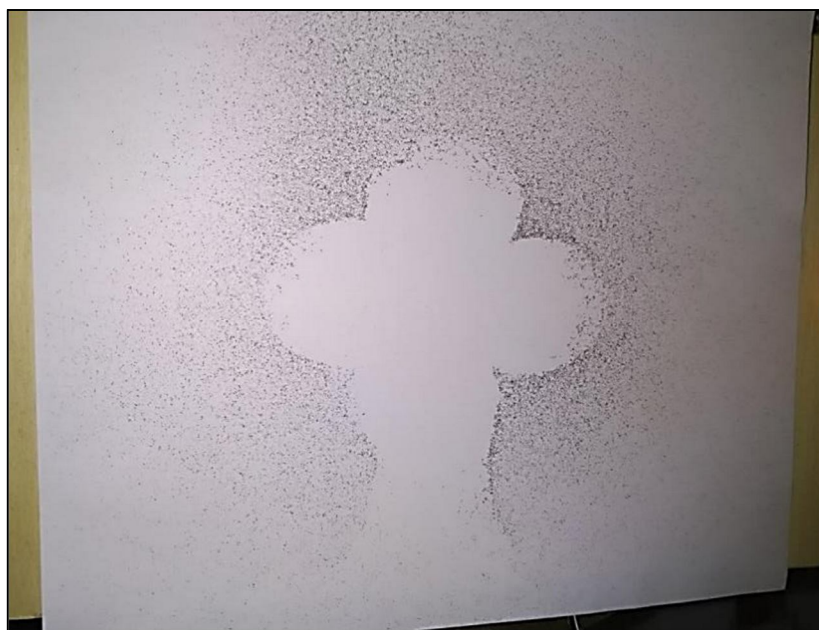


Figura 3.9: Ombra con polvere di ferro su lastra di legno. In figura è ripotata la foto di una delle ombre da me ottenute con polvere di ferro sparsa uniformemente sopra un foglio di carta adagiato su una lastra di legno a sua volta ricoperta di stagnola nella faccia posta a contatto con il disco. In questo caso la punta è stata caricata negativamente ed è possibile apprezzare un disco di fondo ampio.

3.4. Ombre con minio e zolfo in polvere

Analizziamo infine le ombre ottenute in laboratorio, principalmente ottenute proiettando tramite un soffiETTO per polveri il minio e lo zolfo. È possibile ottenere le ombre anche utilizzando individualmente queste due polveri, come riportato in Figura 3.10; ma ovviamente avendo lo zolfo un colore giallo pallido e utilizzando un foglio di carta bianco non si apprezza appieno l'ombra.

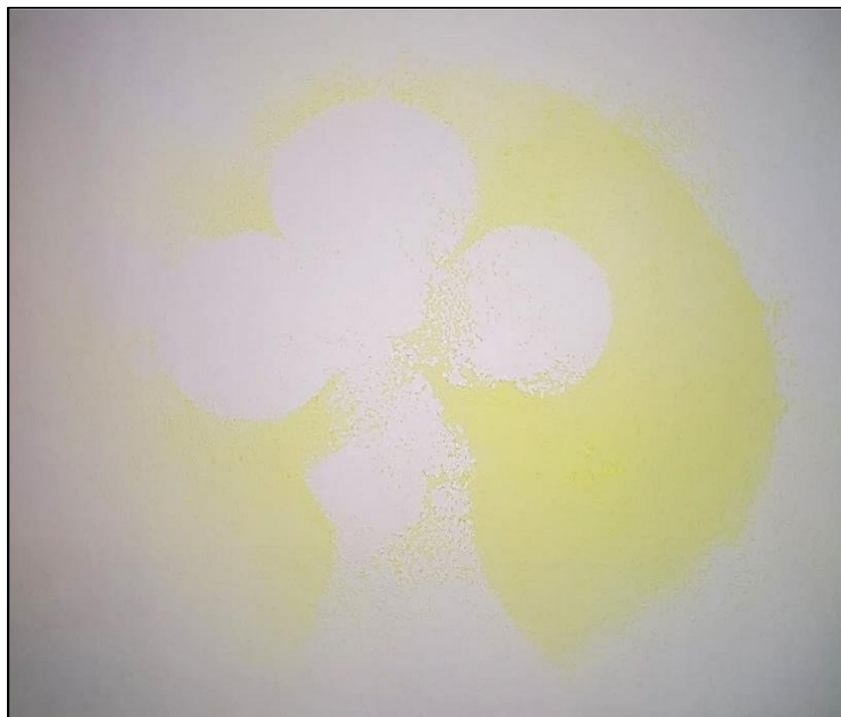


Figura 3.10: Ombra con polvere di zolfo su lastra di legno. In figura è ripotata la foto di una delle ombre da me ottenute con polvere di zolfo proiettata grazie a un soffiETTO. Tra il foglio di carta e il disco è posizionata una lastra di legno spessa qualche millimetro e avente la faccia inferiore ricoperta con della stagnola. La punta, caricata negativamente, non era perfettamente posizionata nel centro del quadrifoglio e per questo è possibile apprezzare un leggero spostamento a sinistra dell'ombra rispetto al disco di fondo.

Si è quindi deciso di unire le due polveri per utilizzarle contemporaneamente come in Figura 3.11 dove la punta era negativa: il colore del minio prevale su quello dello zolfo, ma si può notare che i dischi di fondo ottenuti sono di un arancione più chiaro rispetto l'usuale colorazione rossastra del minio. Anche in questo caso le polveri sono state inserite nel campo elettrico tramite il soffiETTO per polveri.



Figura 3.11: Ombra con polvere di Villarsy su lastra di legno. In figura è ripotata la foto di una delle ombre da me ottenute con polvere di minio e zolfo, proiettata grazie a un soffietto. Tra il foglio di carta e il disco conduttore dell'apparato è posizionata una lastra di legno, spessa qualche millimetro e avente la faccia inferiore ricoperta con della stagnola. La punta era carica negativamente.

Come accadeva per le ombre prodotte con la polvere di ferro sulla lastra di legno, anche in questo caso si è riscontrata una certa attrazione tra la lastra e il foglio quando si spostava questo. Inoltre, quando si inclinava il foglio, fino a ribaltarlo completamente, la polvere di Villarsy cadeva in parte, mentre la restante rimaneva fusa col foglio come in Figura 3.12 (ottenuta con la macchina di Wimshurst) e in Figura 3.13 (ottenuta invece con il generatore di Van De Graaff). Questo curioso effetto potrebbe avvenire a causa di un leggero riscaldamento delle regioni del disco da parte del campo elettrico; oppure è dovuto alla pressione elettrostatica, prendendo per la costante dielettrica del vuoto il valore $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ e considerando il campo elettrostatico paria al valore della rigidità dielettrica dell'aria secca a pressione standard, per cui $E = 3 \cdot 10^6 \text{ V/m}$; allora la pressione elettrostatica è circa pari a $p = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \sim 40 \text{ Pa}$. Se si considera la pressione all'interno del laboratorio di una atmosfera, allora si ha approssimativamente un incremento dello 0.04%. Una ipotesi alternativa potrebbe essere che tra le particelle di polvere e il foglio di carta avvenga una qualche reazione elettrochimica.

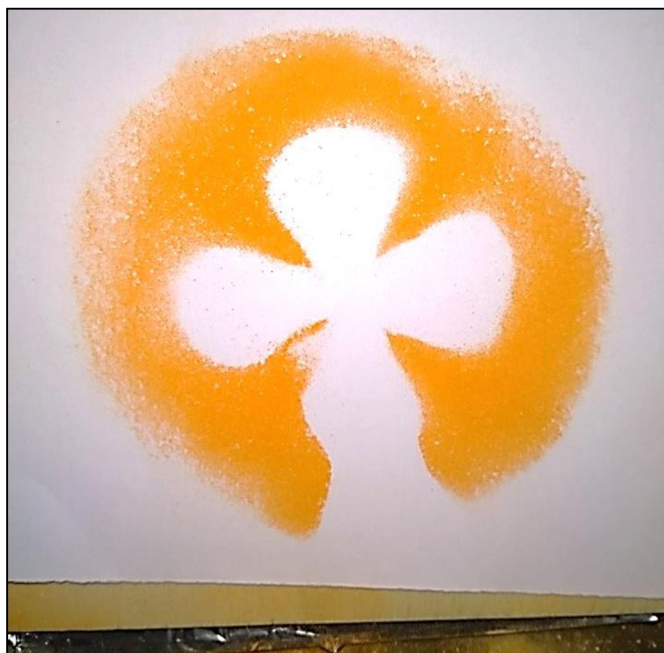


Figura 3.12: Ombra con polvere di Villarsy e punta positiva, dopo aver scosso il foglio. In figura è ripotata la foto di una delle ombre da me ottenute con polvere di minio e zolfo, proiettata grazie a un soffietto. Tra il foglio di carta e il disco conduttore dell'apparato, è posizionata una lastra di legno spessa qualche millimetro e avente la faccia inferiore ricoperta con della stagnola. Dopo avere proiettato la polvere e scaricato l'apparato, è stato scosso il foglio: parte della polvere è cascata, mentre l'altra parte è rimasta ben salda al foglio. Si può notare un arancione vivo del fondo, questo suggerisce una elevata presenza di minio.

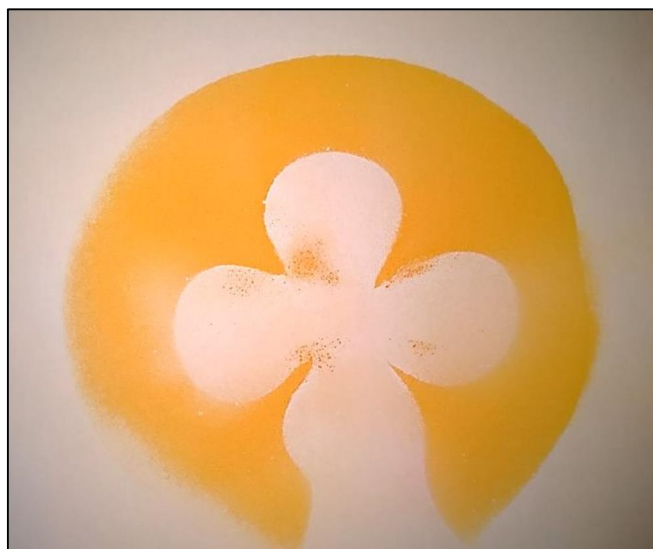


Figura 3.13 Ombra con polvere di Villarsy, dopo aver scosso il foglio. In figura è ripotata la foto di una delle ombre da me ottenute con polvere di minio e zolfo proiettata grazie a un soffietto. Tra il foglio di carta e il disco conduttore dell'apparato è posizionata una lastra di legno spessa qualche millimetro e avente la faccia inferiore ricoperta con della stagnola. Dopo avere proiettato la polvere e scaricato l'apparato, è stato scosso il foglio: parte della polvere è cascata, mentre l'altra parte è rimasta ben salda al foglio. Questa ombra in particolare è stata ottenuta collegando il generatore di Van De Graaff.

Si è provato ad agire con una scarica continuata nel tempo, come si può notare in Figura 3.14. L'effetto della carica, acquisita dal quadrifoglio, tende a fare allargare il disco di fondo e a fare rimpicciolire l'ombra. Possiamo infatti osservare un disco di fondo in espansione, essendo ai bordi ancora più chiaro e quindi ricoperto con meno polvere, e una ombra con dei contorni netti, ma in prossimità del disco tendono a sfumarsi e parte dello spazio è già occupato con una minima quantità di polvere. Questa ombra in particolare è stata ottenuta con il generatore di Van De Graaff, ma tale effetto si è riscontrato anche nelle ombre ottenute con la macchina di Wimshurst.



Figura 3.14: Ombre con polvere di Villarsy e con scarica continuata nel tempo. In figura è riportata la foto di una delle ombre da me ottenute con polvere di minio e zolfo proiettata grazie a un soffietto. Questa ombra in particolare è stata ottenuta collegando il generatore di Van De Graaff, con una scarica continuata nel tempo. Si può quindi osservare l'effetto della carica acquisita dalla croce: il disco di fondo è più sfumato nel bordo esterno poiché tende ad allargarsi; invece l'ombra tende a rimpicciolirsi, per questo ha dei contorni ben netti che in prossimità del disco di fondo iniziano già ad essere occupati, in minima parte, dalla polvere.

In ultimo si è provato ad ottenere l'ombra adagiando il foglio direttamente sul disco conduttore e spargendo sopra di questo uno strato sottile e uniforme di minio e zolfo. Inoltre, si è scelto di utilizzare una scarica di qualche secondo e per agevolare lo spostarsi delle particelle di polvere, da sotto l'apparato, si è percossa la parte inferiore del disco metallico con un cucchiaino in ceramica. L'ombra così ottenuta, con punta negativa, è riportata in Figura 3.15:

essa è ricoperta dalle particelle di zolfo, il disco di fondo è sfumato al contorno e prevalentemente è occupato dal minio, sebbene ci siano delle chiazze di zolfo. Queste ultime sono probabilmente dovute a scariche fra la croce e il disco, in analogia a quanto accadrebbe con una lastra spessa di ebanite e una deriva nell'apparato.



Figura 3.15: Ombra composta con polveri di Villarsy. In figura è riportata una delle ombre composte da me ottenute con polvere di minio e zolfo. Possiamo vedere l'ombra ricoperta dalle particelle di zolfo e il disco di fondo, sfumato al contorno e prevalentemente occupato dal minio, sebbene ci siano delle chiazze occupate dallo zolfo. Queste ultime sono probabilmente dovute a delle scariche fra la croce e il disco.

Conclusione

Tramite le ricerche e lo studio per questa tesi, ho avuto l'opportunità di conoscere un grande fisico italiano; è soprattutto grazie a lui se oggi ci troviamo qui a Bologna a studiare fisica. L'impatto che Righi ha avuto sull'Ateneo, ma anche sulla cultura e sul progresso scientifico, è stato in parte dimenticato o è sconosciuto ai più. La sua fama è andata perduta col tempo, eppure è stato un fisico di livello internazionale, molto apprezzato dai suoi contemporanei.

Studiando e analizzando uno dei suoi lavori, riguardanti le ombre elettriche, sono riuscita a riprodurle in laboratorio. I risultati da me ottenuti sono compatibili con quelli riportati da Righi nell'articolo *"Le Ombre Elettriche, Il memoria, del Professore Augusto Righi"*¹³, preso come riferimento per la parte sperimentale; inoltre, nonostante l'enorme progresso delle conoscenze acquisite nell'ultimo secolo, la spiegazione del fenomeno da lui fornita non è distante dalle nostre concezioni e rimane ancora valida.

Ringraziamenti

Un particolare ringraziamento è per la prof.ssa Laura Fabbri che mi ha introdotta alla scoperta di Augusto Righi: mi ha accompagnata, aiutata e seguita nel progetto e nella stesura di questa tesi. Un altro ringraziamento è per il prof. Eugenio Bertozzi che mi ha guidata attraverso la parte storica. Riporto il ringraziamento al prof. Romano Serra, il quale mi ha reso disponibile il suo laboratorio con le apparecchiature necessarie.

Un ringraziamento altrettanto particolare va ai miei genitori che in questi anni mi hanno permesso di studiare, cercando di darmi la massima tranquillità, nonostante tutti gli imprevisti, gli interventi e i giorni passati in ospedale. Un ringraziamento a tal proposito va anche alla mia famiglia che mi è stata sempre accanto.

Infine ultimi, ma non per importanza, ringrazio le mie amiche e i miei amici, compagni di università e di svago, che mi supportano e sopportano ogni giorno.

Chiara.

Bibliografia

¹ *Augusto Righi e la sua opera a mezzo secolo dalla scomparsa*, Antonio Rostagni, 11 dicembre 1971, Accademia Nazionale dei Lincei.

² <https://www.aif.it/fisico/biografia-augusto-righi/>

³ *Augusto Righi: Fisico e Matematico — una rilettura biografica*, Quaderni di storia della fisica, N. 19-2017, Giorgio Dragoni

⁴ <https://www.associazioneamec.com/notiziario-della-salute/elettricit -dalle-scoperte-alluso-sulluomo/tutte-le-pagine>

⁵ *Personaggi e scoperte della fisica, da Galileo ai quark*, Emilio Segr , ristampa 14 del 2018, pp.173-236.

⁶ *Per Augusto Righi XII Aprile MCMVII*, Bologna, Nicola Zanichelli MCMVII, Ristampa del 20-24 settembre 2010 in occasione del XCVI Congresso Nazionale della Soci t  Italiana di Fisica, a cura di Giorgio Dragoni, Martina Lodi, Guglielmo Garofalo, Daniela Negrini.

⁷ *The Nobel Population, 1901-1937. A Census of the Nominators and Nominees for the Prizes in Physics and Chemistry* (Office for History of Science, Univeristy of California, Berkeley), E. Crawford, J. L. Heilborn, R. Ullrich, 1987.

⁸ <https://fisica-astronomia.unibo.it/it/dipartimento/enti-di-ricerca>

⁹ *Le Feste Giubilarie di Augusto Righi per la inaugurazione del Nuovo Istituto di Fisica (XII aprile MCMVII)*, Bologna, Nicola Zanichelli MCMVII.

¹⁰ *Quando si pu  parlare di scoperta scientifica o tecnica? Il "caso" di Chester Carlon, P l Sel nyi e Augusto Righi*, Giorgio Dragoni

¹¹ *Augusto Righi e la sua universit  nel secolo scorso, Documenti, cimeli e ricordi, Catalogo della Mostra, Palazzo Re Enzo, aprile-maggio 1971*, Giorgio Tabarroni, Tipografia Compositori, Bologna, 1971, pp.1-11.

¹² *Le "Ombre Elettriche" di A. Righi Un'anticipazione delle macchine fotostatiche*, Tesi di Laurea Specialistica in Didattica e Storia della Fisica presentata da Lisa Levizzani con relatore Giorgio Dragoni, A.A. 2004-2005.

-
- ¹³ *Memorie della Accademia delle scienze dell'Istituto di Bologna*, 1881, volume s.4, fascicolo t.2, pag. 555-567.
- ¹⁴ Silliman J. XLIX pag.381, *die Fortschritte der Physik*, XXVI pag. 698.
- ¹⁵ Carl's Repertorium für experimental Physik, agosto 1881 e seg.; Beiblätter, 1881 n. 2., 6.
- ¹⁶ <https://www.fstfirenze.it/macchina-elettrostatica-di-holtz/>
- ¹⁷ http://www.conilfilodiarianna.it/home/?page_id=848
- ¹⁸ *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola I, fig. 10 e 11.
- ¹⁹ *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, art. 5.
- ²⁰ Phil. Mag. 1880 n.10 pag. 234 e seg.
- ²¹ Beiblätter, 1880 n.11.
- ²² *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola I, fig. 1.
- ²³ *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, art. 15.
- ²⁴ *Electricity and Magnetism*, Maxwell, t. I, pag. 220.
- ²⁵ *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola I, fig. 4.
- ²⁶ *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola I, fig. 5.
- ²⁷ *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola I, fig. 21.
- ²⁸ *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola II, fig. 1.
- ²⁹ *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola II, fig. 2.
- ³⁰ *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola II, fig. 3.
- ³¹ *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola II, fig. 5.
- ³² *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola I, fig. 14.
- ³³ *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola II, fig. 6.
- ³⁴ *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola III, fig. 3.
- ³⁵ *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola III, fig. 2.
- ³⁶ *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola I, fig. 15.
- ³⁷ *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola I, fig. 16.

³⁸ *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola III, fig. 5.

³⁹ *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola I, fig. 18.

⁴⁰ *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola III, fig. 6.

⁴¹ *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola III, fig. 7.

⁴² *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola III, fig. 8.

⁴³ *Le Ombre Elettriche*, Augusto Righi, 1881, Tavola III, fig. 9.

⁴⁴ *Fisica Vol. II Elettromagnetismo e Onde*, P. Mazzoldi, M. Nigro, C. Voci.